

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jurica Kus

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Mario Šavar

Student:

Jurica Kus

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 26-02-2015	Prilog
Klasa: 602-04/15-6/3	
Ur.broj: 15-1703-15-83	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jurica Kus**

Mat. br.: 0035178620

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun koeficijenata uzgona i otpora rotora vjetroturbine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wind turbine lift and drag coefficient calculation**

Opis zadatka:

Povećanom potrebom za energijom, a posebno zelenom energijom, vjetroturbine su se pokazale kao novi trend u energetici. Do sada nezanimljive zbog relativno skromnih snaga, sada su vrlo zanimljive zbog svoje isplativosti i vrlo čiste energije.

U završnom radu potrebno je provesti proračun rotora vjetroturbine podjelom na parcijalne strojeve za definiranu geometriju radnog kola. Potrebno je provesti računalnu simulaciju opstrujavanja svakog pojedinog parcijalnog stroja (aeroprofila) te izračunati raspored tlaka na lopatici. U računalnoj simulaciji je potrebno primijeniti model dvodimenzijanskog potencijalnog strujanja oko aeroprofila. Pri proračunu koristiti teoriju potencijalnog strujanja i graničnog sloja. Primijeniti metodu panela i integralne metode za proračun graničnog sloja.

Rad treba sadržavati:

1. Opis rada vjetroturbine
2. Opis modela strujanja (dvodimenzijansko, potencijalno strujanje nestlačivog fluida)
3. Definiciju geometrije lopatica rotora (definirati aeroprofile za svaki parcijalni stroj)
4. Izračun rasporeda tlaka na lopatici (primjenom računalnog programa)
5. Proračun sile, aerodinamičkog koeficijenta sile uzgona i otpora te momenta i snage turbine
6. Diskusiju rezultata i zaključke.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

U radu treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sci. Mario Šavar

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Mariu Šavaru i dr.sc. Severinu Krizmaniću na ukazanoj pomoći, strpljenju i savjetima pri izradi ovog završnog rada.

Završni rad napravljen je u okviru RCOP projekta "Centre of Excellence for Structural Health" (CEEStructHealth) sufinanciranog iz sredstava Europske unije (ugovor IPA2007/HR/16IPO/001-040513).

Jurica Kus

Sadržaj:

Sadržaj:	1
Popis slika:	3
Popis tablica:	5
Popis oznaka:	6
Sažetak:	8
1. Uvod	9
2. Opis rada vjetroatregata	10
2.1. Dijelovi vjetroatregata	10
2.2. Opis rada vjetroatregata.....	12
2.3. Iskoristivost.....	12
3. Opis modela strujanja	16
4. Definiranje geometrije lopatica rotora	19
4.1. Definiranje aeroprofila	21
4.2. Definiranje napadnog kuta i sila.....	23
4.3. Osnovni podaci o vjetroatregatu	28
5. Modeliranje i diskretizacija	30
5.1. Primjenjeni modeli i parametri	30
5.2. Diskretizacija modela.....	31
6. Izračun rasporeda tlaka	33
7. Proračun snage	40
7.1. Proračun sila i koeficijenta.....	40
7.1.1. Rezultati proračuna za profil DU40	41

7.1.2.	Rezultati proračuna za profil DU35	42
7.1.3.	Rezultati proračuna za profil DU30	43
7.1.4.	Rezultati proračuna za profil DU25	44
7.1.5.	Rezultati proračuna za profil DU21	45
7.1.6.	Rezultati proračuna za profil NACA64618.....	46
7.2.	Proračun momenta i snage	47
8.	Diskusija rezultata i zaključak.....	52
9.	Literatura.....	54

Popis slika:

Slika 1.1. Prikaz dijelova vjetroatregata	11
Slika 4.1. Prikaz lopatice s pripadajućim osima.....	19
Slika 4.3. Raspodjela twist kuta po duljini lopatice	21
Slika 4.4. Bitnije dimenzije aeroprofila	22
Slika 4.5. Konture parcijalnih strojeva	23
Slika 4.6. Relativne brzine vjetra i kutevi napada vjetra.....	24
Slika 4.8. Koordinatni sustav	25
Slika 4.9. Trokuti brzina i sila	26
Slika 4.10. Dimenzije vjetroatregata.....	28
Slika 4.11. Pitch control.....	29
Slika 4.12. Dimenzije glavčine.....	29
Slika 5.1. Diskretizacija panelima.....	31
Slika 6.1. Raspodjela koeficijenta tlaka po obodu profila DU40.....	33
Slika 6.2. Raspodjela tlaka po obodu profila DU40	34
Slika 6.3. Raspodjela tlaka po obodu profila DU35	34
Slika 6.4. Raspodjela tlaka po obodu profila DU30	35
Slika 6.5. Raspodjela tlaka po obodu profila DU25	35
Slika 6.6. Raspodjela tlaka po obodu profila DU21	36
Slika 6.7. Raspodjela tlaka po obodu profila NACA64618.....	36
Slika 6.8. Raspodjela koeficijenta tlaka po obodu profila DU30 pri napadnom kutu 0°	37
Slika 6.9. Raspodjela brzina u okolini profila DU30 pri napadnom kutu 0°	38
Slika 6.10. Raspodjela koeficijenta tlaka po obodu profila DU30 pri napadnom kutu 20°	38
Slika 6.11. Raspodjela brzina u okolini profila DU30 pri napadnom kutu 20°	39
Slika 7.1. Raspodjela resultantne sile po duljini lopatice	47
Slika 7.2. Raspodjela resultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $36,84^\circ$	49
Slika 7.4. Raspodjela resultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $44,84^\circ$	50
Slika 7.4. Raspodjela resultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $50,84^\circ$	50

Slika 7.4. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $64,84^\circ$	51
Slika 7.4. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $72,84^\circ$	51
Slika 8.1. Brzine strujanja oko profila DU30 pod kutem napada vjetra 16°	52

Popis tablica:

Tablica 4.1. Točni položaji i geometrija aeroprofila	22
Tablica 7.1. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU40.....	41
Tablica 7.2. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU40.....	42
Tablica 7.3. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU35.....	42
Tablica 7.4. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU35.....	42
Tablica 7.5. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU30.....	43
Tablica 7.6. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU30.....	43
Tablica 7.7. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU25.....	44
Tablica 7.8. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU25.....	44
Tablica 7.9. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU21.....	45
Tablica 7.10. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU21.....	45
Tablica 7.11. Ulazne vrijednosti za aeroprofil NACA64618.....	46
Tablica 7.12. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil NACA64618	46
Tablica 7.13. Vrijednosti snaga i momenata za proračunate pitch kuteve.....	49

Popis oznaka:

A N ukupna sila na lopaticu,

a m/s⁻¹ akceleracija,

C_L - koeficijent uzgona,

C_D - koeficijent otpora,

C_p - koeficijent tlaka,

C_p - stupanj aerodinamičke pretvorbe,

c m duljina chorda, tetive,

d m duljina pitch osi od korjena lopatice,

E_k J kinetička energija,

F N ukupna sila na aeroprofil,

F_D N sila otpora,

F_L N sila uzgona,

F_u N sila a profil u smjeru kutne brzine,

M Nm moment,

P W snaga,

p Pa tlak,

r m udaljenost na lopatici od osi rotora,

Re - Reynoldsov broj,

V_{rel} m/s relativna brzina vjetra na profil,

V_{vjetra} m/s brzina vjetera,

v m/s srednja brzina,

v_1 m/s brzina ispred lopatice,

v_2 m/s brzina iza lopatice,

α deg napadni kut,

β deg kut između brzine vjetera i relativne brzine vjetera,

γ deg kut između ukupne sile na lopaticu i sile otpora,

ε J/kg disipacija kinetičke energije,

μ Pas dinamička viskoznost,

ν m/s² kinematička viskoznost,

ρ kg/m³ gustoća,

ω s⁻¹ obodna brzina,

ϕ deg ukupni kut profila,

ϑ_{twist} deg twist kut profila,

ϑ_{pitch} deg pitch kut lopatice.

Sažetak:

Tema završnog rada je proračun koeficijenta uzgona i otpora vjetroatregata. Nakon opisa rada vjetroatregata opisan je i primjenjeni model strujanja koji je u ovom slučaju dvodimenzijsko, potencijalno strujanje nestlačivog fluida. Proračun snage je napravljen tako da je lopatica podjeljena na parcijalne strojeve, tj. aeroprofile. Geometrija aeroprofila je zadana od strane proizvođača lopatica i kao takva je unešena u programski paket JavaFoil u kojemu je rađena simulacija strujanja.

Kutevi napada određeni su prema referentnom profilu DU30, na 30% duljine lopatice gledano od korijena lopatice. Za referentni profil DU30 izračunati su ekstremni koeficijenti uzgona te su za te kuteve napada vjetra određeni pitch kutevi (kutevi zakreta cijele lopatice). Prema izračunatim pitch kutevima za referentni profil rađeni su proračuni za ostale parcijalne strojeve prema njihovim kutevima napada vjetra.

Nakon što su se odredili kutevi napada za svaki aeroprofil, napravljene su simulacije nasmujavanja vjetra te je izračunata raspodjela tlaka po lopatici vjetroatregata. Za strujanje oko profila korištena je metoda panela pri konstantnom kutnom brzini rotora i konstantnom brzini vjetra.

Proračun sile i aerodinamičkih koeficijenata uzgona i otpora te momenta i snage vjetroatregata napravljen je tako da se odredila rezultanatna sila na svakom od aeroprofila te se sa tim vrijednostima išlo u izradu polinoma koji opisuje raspodjelu rezultanatnih sila duž lopatice. Integriranjem tog polinoma uz korištenje poznatih matematičkih relacija iz mehanike fluida dobio se moment koji djeluje na lopaticu i snaga vjetroatregata.

1. Uvod

Vjetroagregati (još poznati i pod nazivima vjetroturbine ili vjetrenjače) od davnina su se počele koristiti, najviše kao mlinovi za mljevenje raznih žitarica ili kao pumpe za vodu. Prve poznate vjetrenjače pojavile su se u Perziji oko 200 godina prije Krista, a prve vjetrenjače u Europi pojavljuju se u 14. stoljeću. Za razliku od perzijskih vjetrenjača, europske su koristile sustav sa horizontalnom osi vrtnje. Sve do 19. stoljeća vjetrenjače su se isključivo koristile ili za pumpanje vode ili za pokretanje mlinova. Prvi vjetroagregat kojemu je namjena bila proizvodnja električne energije dizajnirao je i izradio Charles F. Brush 1888. godine u američkom gradu Clevelandu u saveznoj državi Ohio. Taj vjetroagregat imao je 144 lopatice promjera 17 metara i mogao je razvijati snagu od 12 kW. Godine 1891. danski znanstvenik i izumitelj Poul L. Cour razvio je prvi vjetroagregat koji je koristio načela aerodinamike. Prvi vjetroagregat suvremenih standarda pušten je u pogon 1931. godine u Jalti, tada dio SSSR-a. Taj vjetroagregat mogao je razviti snagu od 100 kW sa faktorom iskorištenja energije od 32%.

Tijekom sedamdesetih i osamdesetih godina dvadesetog stoljeća vjetroagregati se počinju sve više koristiti u elektranama od 50 do 600 kW, a polako izlaze iz uporabe kao pogoni za mlinove i pumpe. Najveći procvat vjetroagregata u osamdesetima dogodio se u Kaliforniji, dok je u Europi i Aziji porast uporabe bio polagan. Početkom devedesetih rast broja vjetroelektrana najviši je bio u Sjevernoj Europi, a uzrok tome su izvrsni prirodni uvjeti s čestim vjetrovima i viša cijena električne energije. Krajem devedesetih godina prošlog stoljeća vjetroagregati počinju doživljavati i veliki procvat u Aziji, kao i u Europi, gdje je do danas izgrađeno više tisuća megavata snage vjetroelektrana. Trend porasta broja vjetroelektrana u Europi trenutno je visok, a razlog je trend razvijanja zelenih energija uz subvencioniranje troškova u izgradnji.

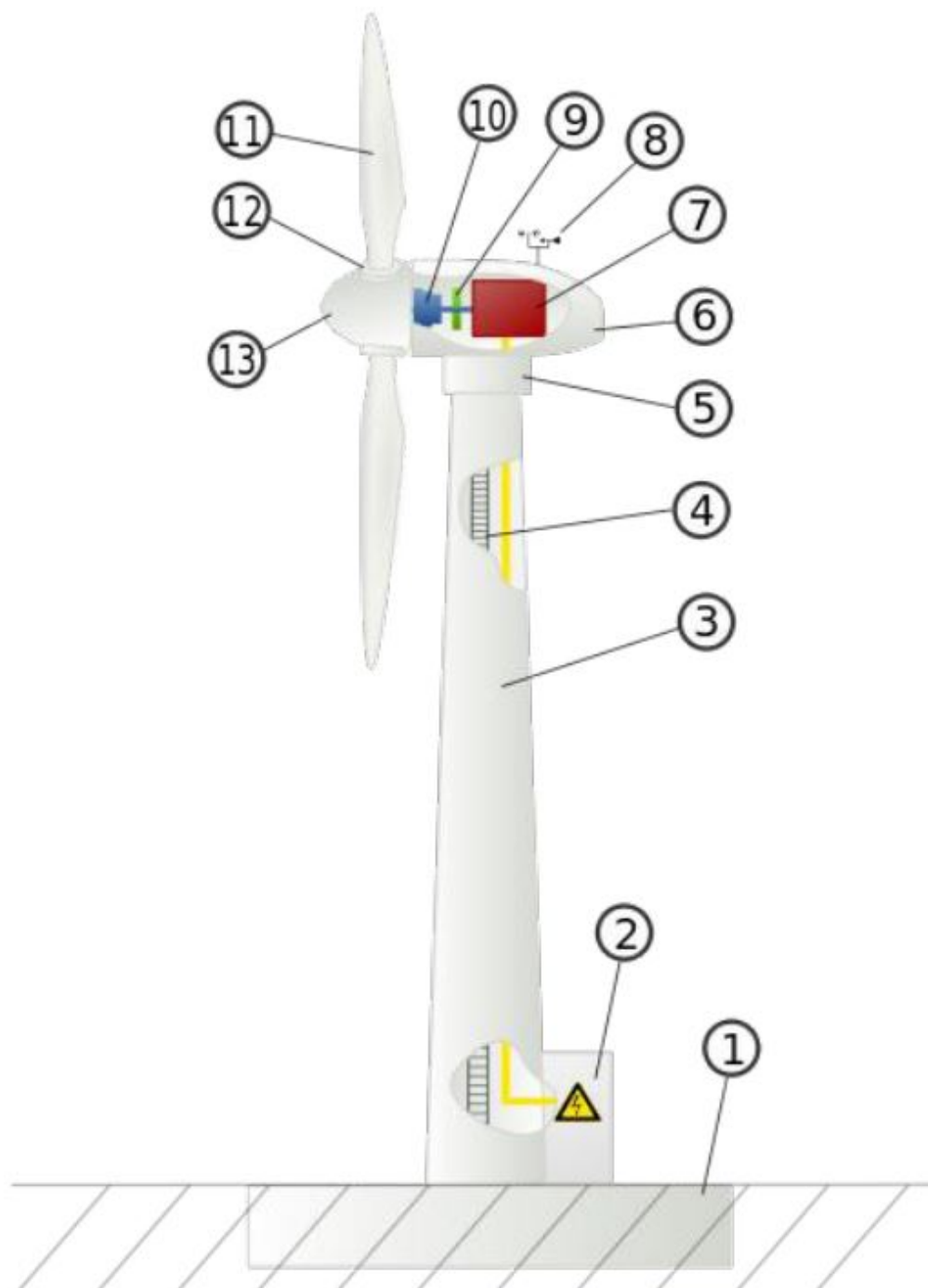
2. Opis rada vjetroagregata

2.1. Dijelovi vjetroagregata

U današnje vrijeme koriste se vjetroagregati s različitim izvedbama konstrukcije i načina funkcioniranja. Najosnovnija podjela je na one s vertikalnom i horizontalnom osi vrtnje. Razlika između te dve izvedbe je u tome što vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje imaju os vrtnje koja prolazi kroz stup agregata, a one s horizontalnom osi imaju os vrtnje okomitu na stup vjetroagregata. U ovom završnom radu opisivati će se vjetroagregat sa horizontalnom osi vrtnje, te su za takav vjetroagregat nabrojani osnovni dijelovi.

Osnovni dijelovi vjetroagregata prikazani na slici su:

1. Temelj
2. Priključak na elektroenergetski sustav
3. Stup
4. Ljestve za pristup gondoli
5. Zakretnik
6. Gondola ili kućište stroja
7. Električni generator
8. Anemometar
9. Kočioni sustav
10. Prijenosnik snage
11. Lopatice rotora
12. Sustav zakretanja lopatica
13. Glavčina rotora



Slika 1.1. Prikaz dijelova vjetroagregata

2.2. Opis rada vjetroatregata

Zadaća vjetroatregata je pretvorba kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Proces pretvorbe energije započinje nasmujavanjem vjetra na lopatice vjetroatregata koje su aerodinamički dizajnirane kako bi se na njima mogla stvoriti uzgonska sila koja iz pokreće. Lopatice su spojene na glavčinu koja je preko prijenosnika snage i kočionog sustava spojena na rotor. Najčešće izvedbe vjetroatregata su sa 3 lopatice, jer se pokazalo da je to najisplativija izvedba. Iskoristivost vjetroatregata u najvišoj mjeri ovisi o samom dizajnu lopatica jer one svojim oblikom moraju preuzeti vjetar i pretvoriti ga u vlastito kretanje. Lopatice se mogu zakretati oko svojih pitch osi unutar spoja sa glavčinom te tako osigurati konstantne brzine vrtnje generatora, a zakretanjem "na nož" tj. na položaj u kojemu se na lopaticama ne stvara uzgonska sila, mogu se i privremeno isključiti iz uporabe. Do isključivanja vjetroatregata iz uporabe dolazi pri velikim brzinama vjetrova radi osiguravanja od mogućih oštećenja.

Vjetroatregati s prijenosnikom snage najčešće koriste multiplikatore. Prijenosnik snage koristi se za prilagođavanje niže brzine vrtnje rotora vjetroturbine na višu brzinu vrtnje električnog generatora. Hlađenje prijenosnika snage najčešće se ostvaruje zrakom, a podmazivanje sintetičkim uljem.

Gondola je kućište stroja koje se nalazi na vrhu stupa agregata i u kojoj su smješteni prijenosnik snage, generator, vratilo i glavčina. Osnovne uloge gondole su zaštita dijelova stroja od raznih vanjskih utjecaja te smanjenje buke prema van. Stup na kojemu se nalazi gondola može biti izveden kao cjevasto konični, rešetkasti, teleskopski, učvršćeni i povezani. Cjevasto konična izvedba stupa se najviše koristi radi dobre čvrstoće i otpornosti na vibracije.

2.3. Iskoristivost

U izvođenju iskoristivosti vjetroatregata koristit ćemo se Betzovim zakonom, koji matematički pokazuje stupanj aerodinamičke pretvorbe, tj. pokazuje omjer snage na vratilu vjetroatregata i

moгуće raspoloživе snage u slobodnoj struji vjеtra. Nastrujavanjem vjеtra na lopaticu njegova struja se iskrivljuje, a na lopatici se stvara uzgonska sila koja ju pokreće. Kako se vjetar nakon nastrujavanja na lopaticu i dalje mora kretati nemoguće je iskoristiti svu njegovu kinetičku energiju i iz toga razloga postoji stupanj iskoristivosti. Najveći stupanj aerodinamičke iskoristivosti je 0,593 što ujedno predstavlja tzv. Betzovu granicu. Betzov zakon nam govori da niti jedan vjetroagregat ne može imati veću iskoristivost od 59,3%.

U nastavku je prikazano matematičko-fizikalno obješnjenje. Pri izvodu uvode se sljedeće pretpostavke: strujanje je nestlačivo i neviskozno, nema gubitaka u ležajevima, struja zraka je horizontalna i konstantna i rotor vjetroagregata je bez težine.

Prema zakonu o očuvanju mase vrijedi:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot S \cdot v = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 , \quad (2.1)$$

gdje su:

\dot{m} - maseni protok

ρ - gustoća fluida

v_1 - brzina fluida ipred lopatice

v_2 - brzina fluida iza lopatice

v - brzina fluida na lopatici

S - površina lopatice rotora.

Sila kojom lopatice djeluju na vjetar prema drugom Newtonovom zakonu može se izraziti:

$$F = m \cdot a , \quad (2.2)$$

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} , \quad (2.3)$$

$$F = \dot{m} \cdot \Delta v , \quad (2.4)$$

$$F = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - v_2) . \quad (2.5)$$

Rad te sile na vrlo malom pokaku jednak je:

$$dW = F \cdot dx . \quad (2.6)$$

Snaga vjetra iznosi:

$$P = \frac{dW}{dx} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v . \quad (2.7)$$

Ako se uvrsti vrijednost sile iz jednadžbe (2.5) u izraz za snagu (2.7) snaga vjetra je:

$$F = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) . \quad (2.8)$$

Snaga vjetra može se izračunati i prema izrazu za kinetičku energiju:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) . \quad (2.9)$$

Uvrštavanjem izraza za maseni protok (2.1) u izraz za snagu (2.9) dobivamo:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) . \quad (2.10)$$

Oba izraza za snagu vjetra su ispravna pa se mogu izjednačiti:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) . \quad (2.11)$$

Sređivanjem izraza (2.11) dobivamo:

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) . \quad (2.12)$$

Što znači da se za brzinu vjetra može uzeti srednja vrijednost brzine ispred i iza lopatice.

Za daljnji izvod stupnja aerodinamičke pretvorbe dodatno se sređuje izraz za kinetičku energiju vjetra.

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) . \quad (2.13)$$

Ako se u izraz (2.13) uvrsti izraz za maseni protok (2.1) i izraz za brzinu (2.12) dobivamo:

$$\dot{E}_k = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right) . \quad (2.14)$$

Deriviranjem gornjeg izraza s obzirom na $\frac{v_2}{v_1}$, dobiva se maksimalna vrijednost za kinetičku

energiju, a ona je za vrijednost $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$.

Time proizlazi maksimalna vrijednost snage vjetra:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 . \quad (2.15)$$

Nakon sređivanja jednadžbe (2.15) dobivamo:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot C_p . \quad (2.16)$$

Iz jednadžbi (2.15) i (2.16) vidimo da stupanj aerodinamičke pretvorbe C_p ima maksimalni iznos

$\frac{16}{27}$, odnosno 59,3%.

3. Opis modela strujanja

U proračunu aeroprofila koristit će se model nestlačivog potencijalnog strujanja fluida koji je ugrađen u software koji će se koristiti, a to je JavaFoil. Također koristit će se metoda panela.

Model nestlačivog potencijalnog strujanja fluida vrijedi u uvjetima kod kojih se viskozne sile mogu zanemariti. Bezvrtložno strujanje se pojavljuje npr. pri opstrujavanju tijela i to u području podalje od stijenke tj. tamo gdje je utjecaj viskoznih sila zanemariv. Strujanje fluida koje nastaje pri samom početku gibanja tijela u mirujućoj tekućini, također se može opisati potencijalnim poljem brzine. U praksi se model potencijalnog strujanja primjenjuje u slučajevima u kojima su viskozne sile jako male u odnosu na inercijske i gravitacijske sile. Tipične primjene modela potencijalnog strujanja su u aerodinamici i teoriji turbostrojeva za određivanje sile uzgona pri optjecanju aeroprofila, te u brodogradnji npr. za određivanje otpora valova gibajućeg broda i u analizi ponašanja plivajućih struktura na valovima. U nastavku prikazan je izvod jednadžbi stacionarnog potencijalnog strujanja.

Nestlačivo strujanje opisano je jednadžbom kontinuiteta:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 . \quad (3.1)$$

Jednadžba količine gibanja ili drugi Newtonov zakon u kojoj su zanemarene viskozne sile glasi:

$$\rho a_i = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} . \quad (3.2)$$

Ako masena sila odgovara sili gravitacije, tada se ona može prikazati preko potencijala, koji za slučaj da je os x_3 usmjerena vertikalno uvis, glasi:

$$\rho f_i = -\rho g \delta_{i3} = -\frac{\partial \rho g x_3}{\partial x_i} . \quad (3.3)$$

Sustav gornje dvije Eulerove jednadžbe (3.2) i (3.3) označuje sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi prvog reda i opisuje neviskozno strujanje fluida.

Jednadžba kontinuiteta je linearna, a jednadžba količine gibanja je nelinearna zbog člana $\rho v_j \frac{\partial v_j}{\partial x_j}$. Zbog nelinearnosti jednadžbe količine gibanja ovaj sustav se može riješiti samo numeričkim putem.

Uz pretpostavku potencijalnog strujanja, u kojem vrijedi:

$$v_j = \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} , \quad (3.4)$$

jednadžba kontinuiteta prelazi u Laplaceovu jednadžbu:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) = 0 , \quad (3.5)$$

ili:

$$\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} = 0 . \quad (3.6)$$

Nelinearni član u jednadžbi količine gibanja prelazi u:

$$\rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho}{2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) , \quad (3.7)$$

pa jednadžba količine gibanja prelazi u oblik:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g x_3 + p \right] = 0 . \quad (3.8)$$

Kako zbroj članova u uglatoj zagradi nije funkcija prostornih koordinata, vrijedi izraz poznat pod nazivom Euler-Bernoullijeva jednadžba:

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g x_3 + p = f(t) , \quad (3.9)$$

gdje je $f(t)$ neka funkcija vremena.

Za slučaj stacionarnog potencijalnog strujanja polazni sustav jednažbi je:

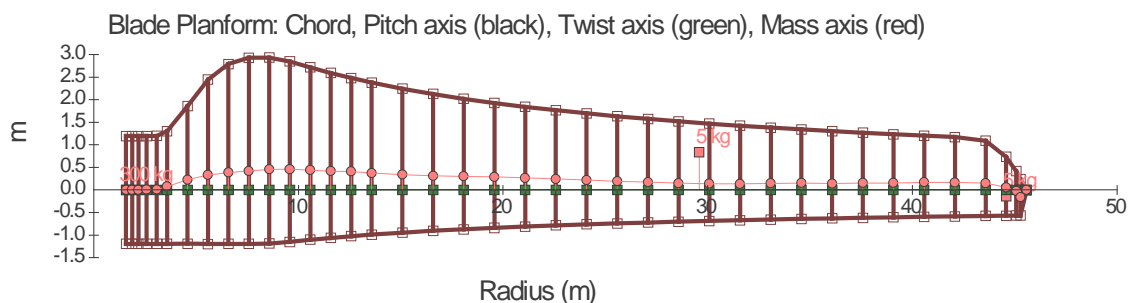
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_j} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g x_3 + p = C = konst. \quad (3.11)$$

4. Definiranje geometrije lopatica rotora

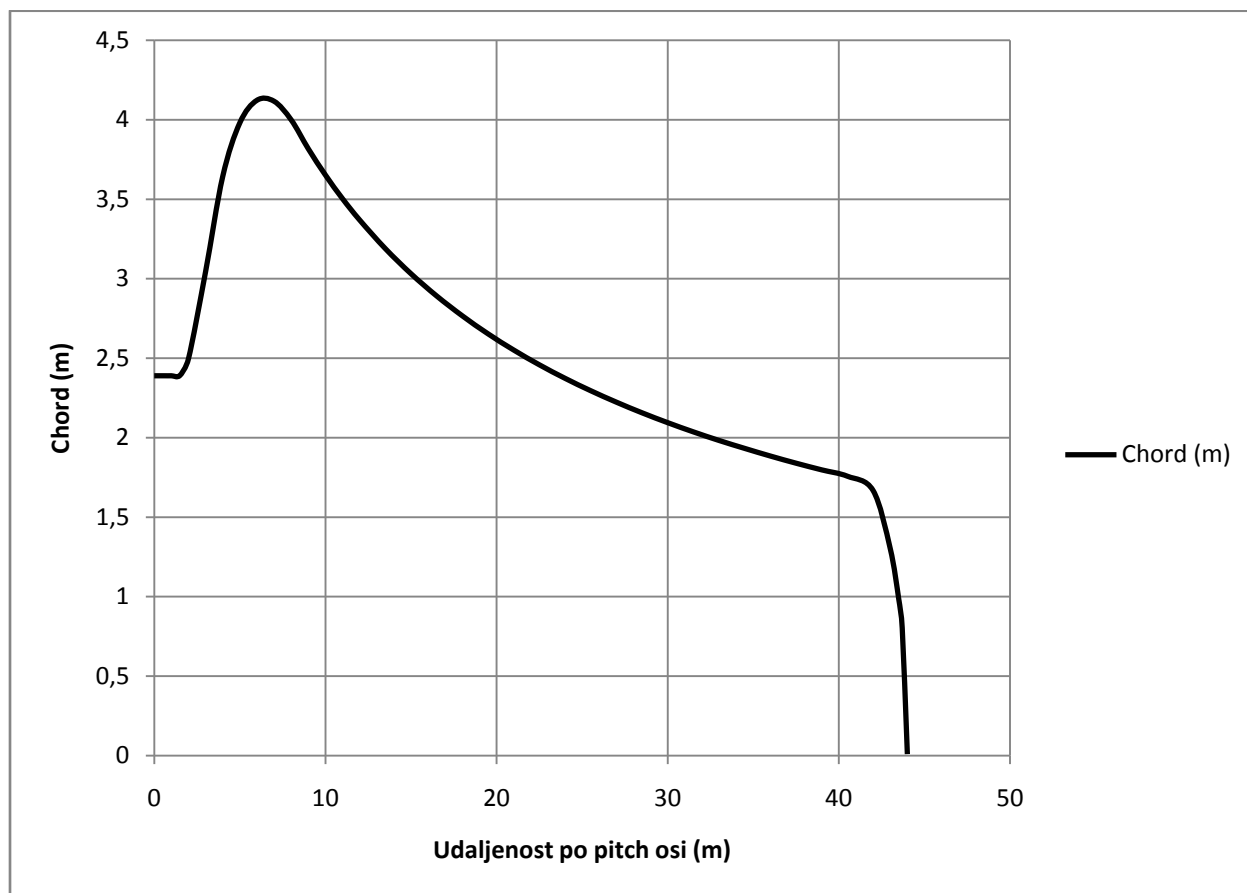
Na rotoru vjetroagregata nalaze se tri iste lopatice. Svaka lopatica definirana je preko sedam aeroprofila koji se nalaze uzduž pitch osi zakrenutih za twist kut. Pitch os je os oko koje se zakreće cijela lopatica i oko nje se razvijaju aeroprofili, a twist os je os oko koje se zakreće svaki pojedini profil za određeni kut. Geometrija je pojednostavljena time što se pitch i twist osi poklapaju.

Prikaz promjene chorda (tetine) po duljini lopatice i različito definirane osi.

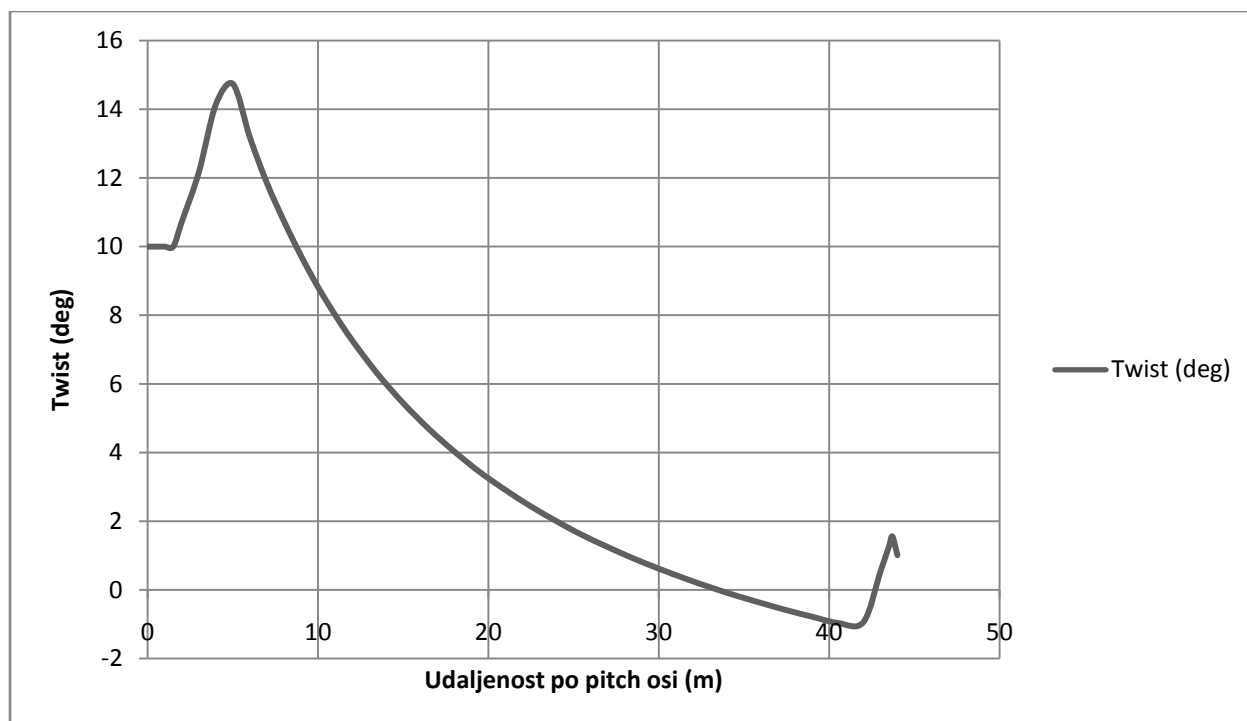


Slika 4.1. Prikaz lopatice s pripadajućim osima

Sljedeće dvije slike dijagramski prikazuju raspodjelu chorda i twist kuta po duljini lopatice.



Slika 4.2. Raspodjela chorda po duljini lopatice



Slika 4.3. Raspodjela twist kuta po duljini lopatice

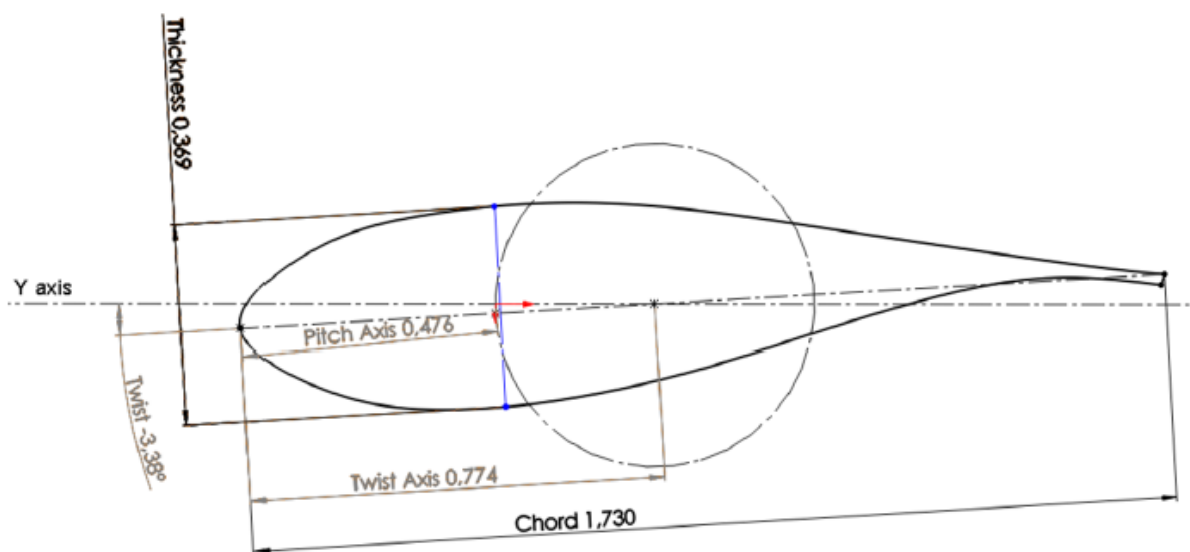
4.1. Definiranje aeroprofila

Na lopatici je, kao što je već prije spomenuto, raspoređeno sedam aeroprofila. Položaj svakog aeroprofila definiran je njegovim chordnom (duljinom tetive) i debljinom (thicknessom) u postocima. Točan položaj određenog aeroprofila određen je linearnom interpolacijom, što se vidi u tablici 4.1..

PROFIL	UDALJENOST PO PITCH OSI (m)	CHORD (m)	THICKNESS (%)	TWIST (deg)
Kružnica	0 - 1	2,39	100	10
DU 99-W-40.lm	6,03	4,12	40	13,15
DU 99-W-350.lm	7,52	4,06	35	11,27
DU 97-W-300.lm	11,1	3,49	30	7,94
DU 91-W2-250.lm	17,25	2,83	25	4,36
DU 93-W-210.lm	25,07	2,32	21	1,71
NACA 64-618	34,5	1,93	18	-0,16

Tablica 4.1. Točni položaji i geometrija aeroprofila

Na slici 4.4. mogu se vidjeti definicije bitnijih dimenzija općenitog aeroprofila.

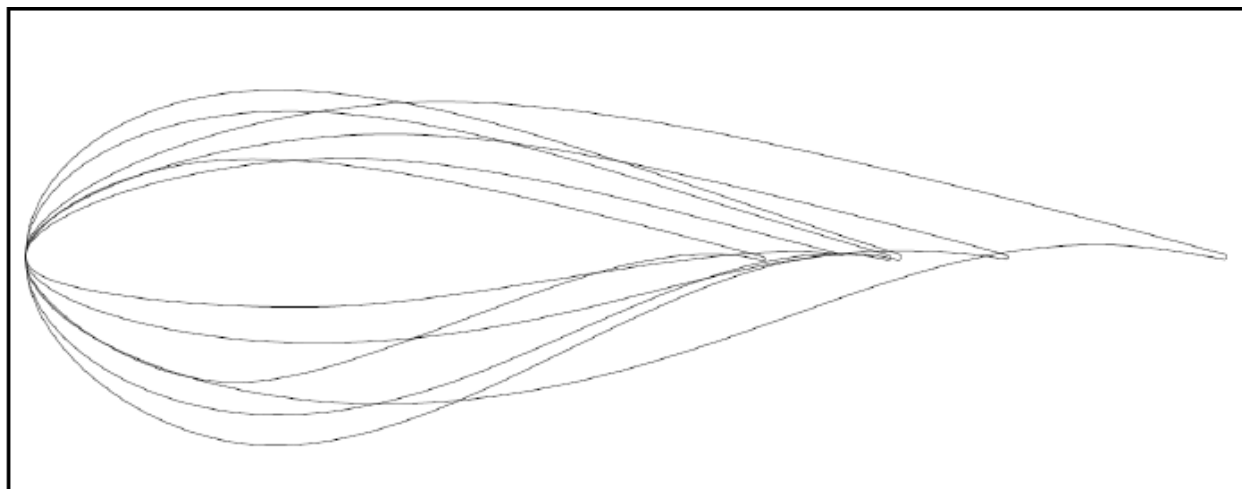


Slika 4.4. Bitnije dimenzije aeroprofila

Radi lakšeg snalaženja i kraćega pisanja umjesto punih naziva aeroprofila koristit će se kraći nazivi s oznakom prema thicknessu: NACA64, DU21, DU25, DU30, DU35 i DU40.

Profili prikazani u tablici 4.1. ujedno su i parcijalni strojevi korišteni u računalnoj simulaciji rađenoj u software-u JavaFoil. Slika 4.5. prikazuje parcijalne strojeve gledano od vrha lopatice prema korijenu.

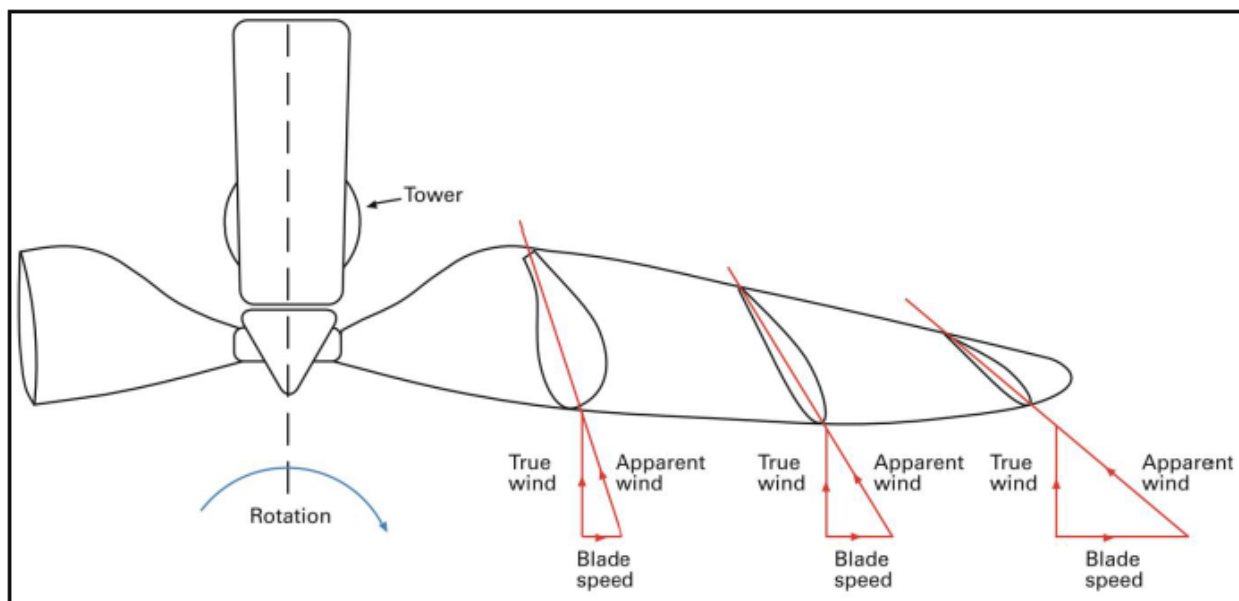
Profili zadani točkama po x i y koordinatama nisi zatvoreni na svojim zadnjim krajevima, a kako je za računalnu simulaciju to neophodno profili su naknadno zatvoreni tako što su zadnja točka gornje konture i zadnja točka donje konture, spojene pravcem. Na taj način svjesno se radi greška, ali ona je u ovom slučaju zanemariva jer su dimenzije pravaca koji spajaju otvorene konture zanemarive u odnosu na dimenzije cijelih aeroprofila.



Slika 4.5. Konture parcijalnih strojeva

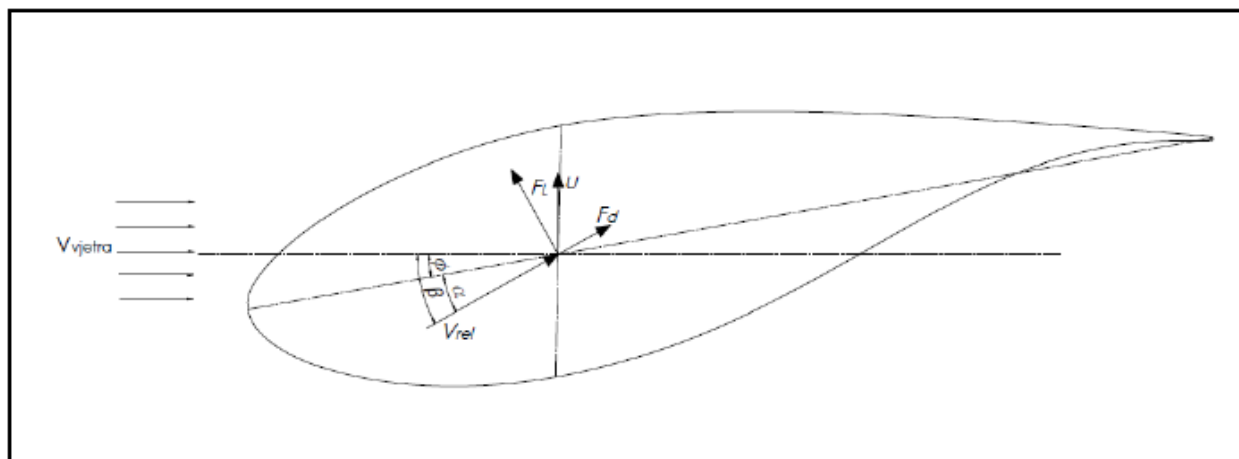
4.2. Definiranje napadnog kuta i sila

Zbog vrtnje rotora vjetroatregata koji ima svoju kutnu brzinu svaki parcijalni stroj na lopatici imati će svoju obodnu brzinu. Različite obodne brzine svakog aeroprofila na lopatici uzrokuju da vjetar nastrujava relativnim brzinama i pod različitim kutevima na svaki parcijalni stroj. Na slici 4.6. vidi se promjena napadnog kuta i relativna brzina nastrujavanja vjetra duž lopatice u slučaju kada će rotor vjetroatregata okreće.



Slika 4.6. Relativne brzine vjetra i kutevi napada vjetra

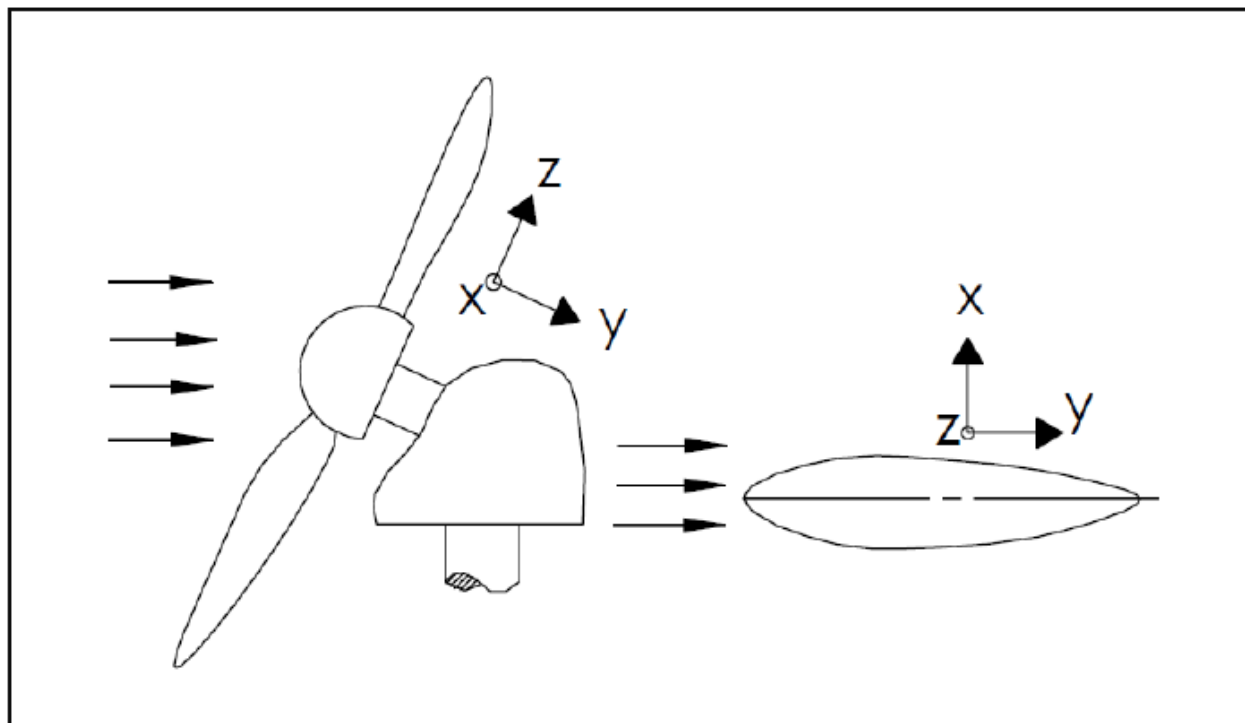
Sa slike 4.6. vidljivo je da aeroprofil koji se nalaze na kraju lopatice, tj. dalje od korijena, imaju najveće obodne brzine što uzrokuje da imaju i najveće relativne brzine i napadne kuteve nastrujavanja vjetra. Napadni kut je definiran kao kut između chord osi profila i vektora relativnog nastrujavanja vjetra kao što je prikazano na slici 4.7.. Napadni kut ima veliki utjecaj na proračun sila i koeficijenata profila.



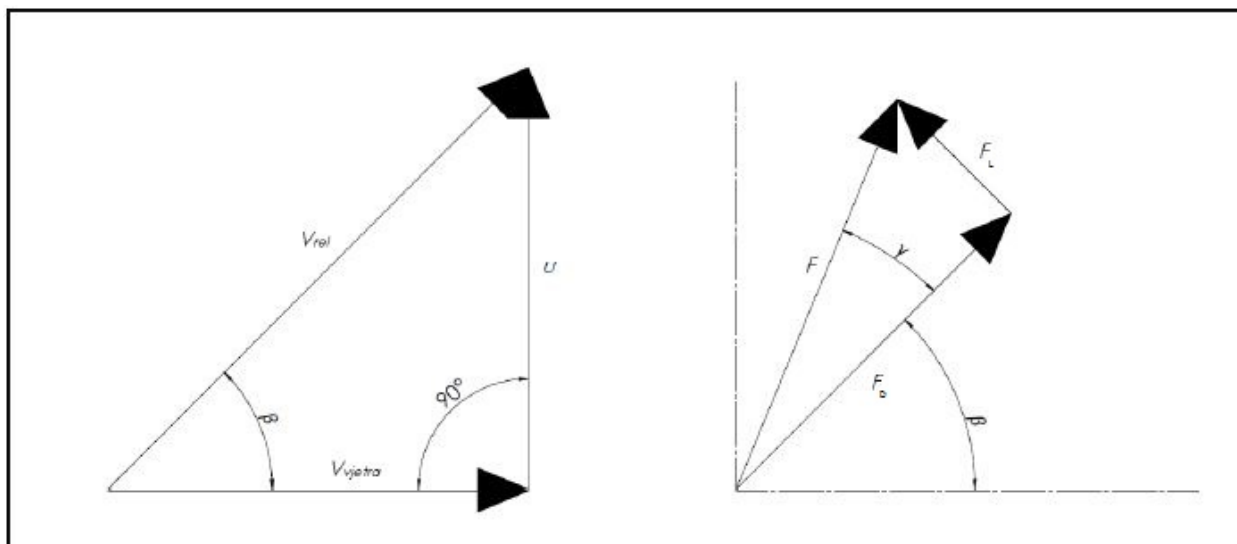
Slika 4.7. Definicija napadnog kuta i sila

Na slici 4.7. vidi se da se aeroprofil može zakrenuti za pitch kut, koji je isti za sve profile, i za twist kut koji je unaprijed definiran za svaki aeroprofil, kao što je dijagramski prikazano na slici 4.3.. Ako zbrojimo ta dva zakreta profila dobivamo ukupni zakret s obzirom na neutralnu os (os nultog zakreta), koja je u slučaju ovog proračuna definirana kao horizontalna os. Brzina vjetra V_{rel} , koju koristimo za proračun, različita je od brzine vjetra V_{vjetra} zbog različitih obodnih brzina aeroprofila na lopatici.

Aeroprofili definirani su tako da se nalaze na lopatici u trenutku kada je ona na "12 sati" i da na njih nastrujava vjetar s lijeve strane, a ishodište takvog koordinatnog sustava je u korijenu i gleda prema kraju lopatice. Takav koordinatni sustav osigurava obodnu brzinu okomito prema gore. Napadni kutevi s donje strane profila su pozitivni, a pitch i twist zakreti su pozitivni u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Na slikama 4.8. i 4.9. prikazani su koordinatni sustav i trokuti brzina i sila proizašli iz takvog koordinatnog sustava.



Slika 4.8. Koordinatni sustav



Slika 4.9. Trokuti brzina i sila

Sile F_L i F_d su sila uzgona tj. "lift", i sila otpora tj. "drag". Sila F_L uvijek je okomita na vektor relativne brzine vjetra V_{rel} , a sila F_d je uvijek kolinearna s vektorom V_{rel} . Rezultirajuća sila koja stvara moment i snagu vjetroatagata je zbroj sila uzgona i otpora.

Na slici 4.9. vidljivo je da će zbog obodne brzine u , vjetar na profil nastrujavati pod kutem β u odnosu na vektor struje vjetra i sa većom relativnom brzinom. Brzine vjetra i obodne brzine poznate su vrijednosti u proračunima kao i kutevi β i ϕ , a sve ostale veličine dobivamo proračunavanjem.

Kut ϕ je ukupni kut zakreta aeroprofila s obzirom na horizontalnu os, a dobiva se zbrajanjem kuta \mathcal{G}_{twist} , koji je za određeni profil uvijek isti, te kuta \mathcal{G}_{pitch} , koji definira zakret cijele lopatice i može se mijenjati:

$$\phi = \mathcal{G}_{twist} + \mathcal{G}_{pitch} . \quad (4.1)$$

Relativna brzina vjetra može se dobiti:

$$V_{rel} = \sqrt{V_{vjetro}^2 + u^2} , \quad (4.2)$$

gdje je u obodna brzina profila i dobiva se:

$$u = r \cdot \omega , \quad (4.3)$$

gdje je r udaljenost profila od središta rotacije (rotora), a ω kutna brzina rotora.

Napadni kut α računa se na način:

$$\beta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{u}{V_{\text{vjetra}}} \quad (4.4)$$

$$\alpha = \beta - \phi \quad (4.5)$$

Nakon proračuna relativne brzine vjetra i napadnog kuta ide se u izradu računalne simulacije iz koje dobivamo sile koje se zbrajaju i preslikavaju na smjer vektora obodne brzine kako bi mogli izračunati snagu vjetroatregata.

Silu F_u u smjeru vektora obodne brzine dobivamo na način:

$$\gamma = \sin^{-1} \frac{F_L}{F} , \quad (4.6)$$

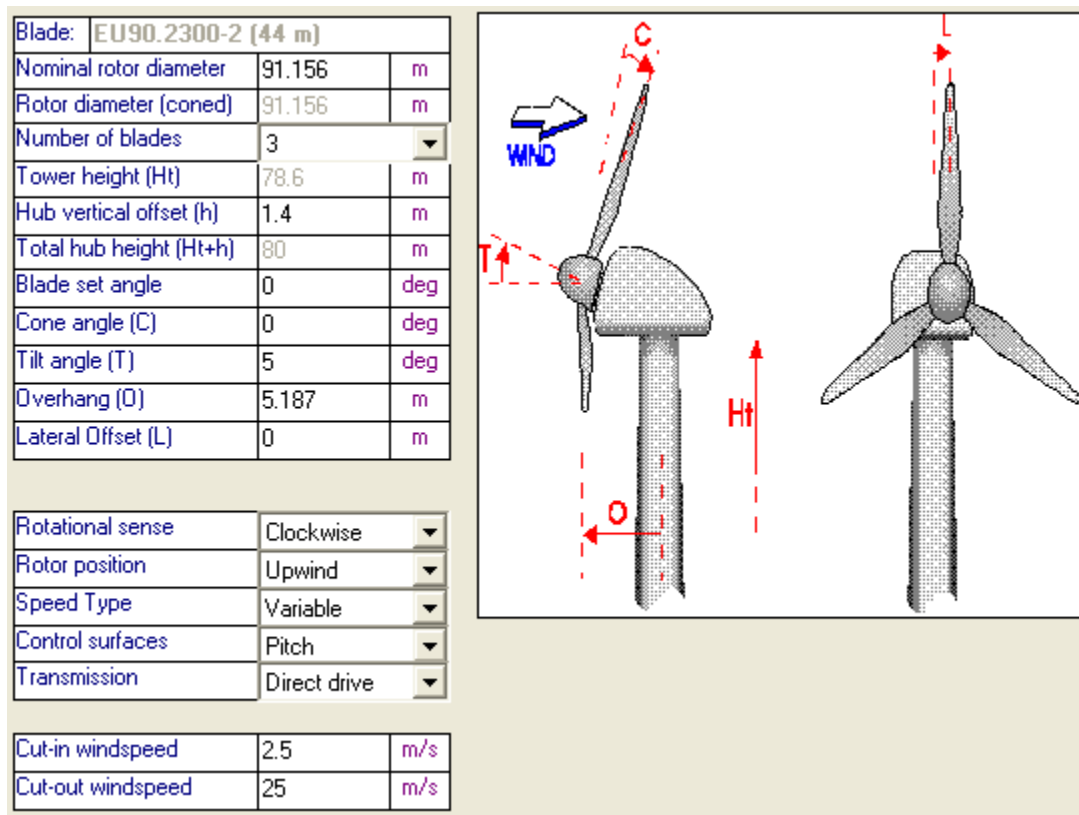
$$F = \sqrt{F_L^2 + F_d^2} , \quad (4.7)$$

$$F_u = F \cdot \cos(90 - \beta - \gamma) \quad (4.8)$$

Sila F_u može, u ovisnosti o napadnom kutu, biti u smjeru obodne brzine i stvarati snagu ili može biti u smjeru suprotnom od obodne brzine i oduzimati snagu, tj. kočiti lopaticu.

4.3. Osnovni podaci o vjetroagregatu

Vjetroagregat za koji je rađen ovaj proračun je Končarov vjetroagregat snage 2,5 MW. Vjetroagregat ima tri lopatice jednakih duljina od 44 metra duž pitch osi. Na slikama 4.1., 4.2., i 4.3. već je prikazana geometrija lopatice, a u nastavku su priložene slike ostalih dimenzija vjetroagregata.



Slika 4.10. Dimenzije vjetroagregata

Na slici 4.9. vidi se da su lopatice zakrenute za "tilt angle" od 5° , ali taj kut u koordinatnom sustavu odabranom za proračun ne mijenja ništa, jer se gleda lopatica kada se nalazi u položaju vertikalno uvis, odnosno kao kazaljka na 12 sati.

Na slici 4.10. prikazane su vrijednosti kutne brzine rotora, a maksimalna brzina rotora je ujedno i optimalna brzina.

Power Production Control

Stall Regulated ☐ Fixed Speed ☐ Variable Speed
Pitch Regulated ☐ Fixed Speed ☒ Variable Speed

Torque-speed curve below rated

☐ Optimum tip speed ratio ☒ Look-up table

Optimal mode gain	Nm/(rad/s)	499072
Minimum Generator Speed	rpm	5.5
Optimal Mode Maximum Speed	rpm	16

Above Rated: Pitch Regulated Speed

Pitch Feathering ☒ Assisted Stall ☐

Minimum Pitch Angle	deg	1.6
Maximum Pitch Angle	deg	94
Demanded Generator Torque	Nm	1.731E+06
Demanded Generator Speed	rpm	16

Supervisory Control

Start... Normal Stop... Emergency Stop...
Brakes... Yaw Control... External Controller...
Parked... Idling... Pitch Actuator...

Transducers

Power Transducer time constant	s	0
Speed Sensor Time Constant	s	0

Pitch control: software rate limits

Minimum pitch rate	-10	deg/s	Actuator...
Maximum pitch rate	10	deg/s	

Torque Control

PI Control ☐ Define...
Discrete External Controller ☒ Define...

Pitch Control

PI Control ☐ Define...
Discrete External Controller ☒ Define...

Controller Dynamics ☒

Slika 4.11. Pitch control

Blade Root

Root Length (L)	1.578	m
Diameter (D)	2.4	m
Drag Coefficient	1	-
Spinner diameter (S)	6.105	m

☐ Tetered hub

Pitch-teeter coupling:
☒ Delta-3 ☐ Special

Delta-3 Angle	0	deg
---------------	---	-----

Direct drive generator

Rotor inertia	146360	kgm ₂
---------------	--------	------------------

☒ Assign Mass

Hub mass properties:

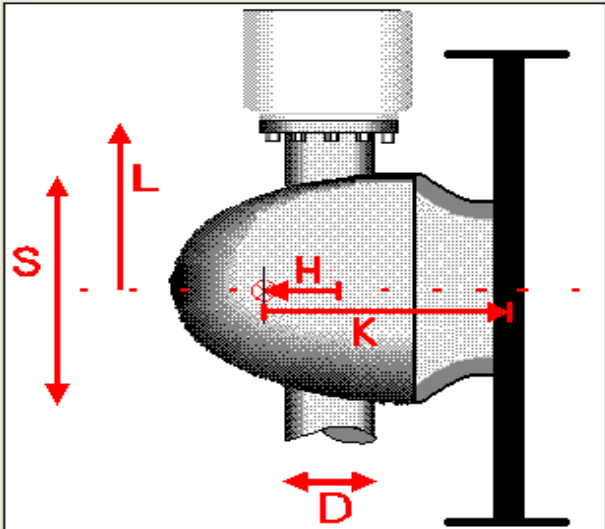
Mass	28198	kg
Centre of mass	-0.24 (H)	m
Inertia about shaft	84415	kgm ₂
Inertia perpendicular to shaft	80377	kgm ₂

Direct drive generator (if not included in nacelle):

Total mass (rotor + stator)	80398	kg
Centre of mass (rotor + stator)	2.008 (K)	m
Inertia about shaft (stator only)	191217	kgm ₂
Inertia perpendicular to shaft (rotor + stator)	220381	kgm ₂

Counterweight for one-bladed turbine

Mass	0	kg
Inertia about shaft	0	kgm ₂



Slika 4.12. Dimenzije glavčine

5. Modeliranje i diskretizacija

Proračuni tlaka i koeficijenta uzgona i otpora te sile uzgona i otpora napravljeni su uz korištenje programskog paketa JavaFoil. U nastavku opisani su korišteni modeli i parametri u izradi računalnih simulacija.

5.1. Primjenjeni modeli i parametri

Kao model za proračun koristit će se dvodimenzijско, potencijalno, viskozno strujanje nestlačivog fluida. Model potencijalnog strujanja već je objašnjen u poglavlju 3. ovoga rada. Za lopaticu su korištena šest aeroprofila tj. parcijalna stroja, pomoću kojih su se interpolacijom dobile vrijednosti za cijelu lopaticu. U računalnim simulacijama pretpostavljeno je stacionarno strujanje fluida.

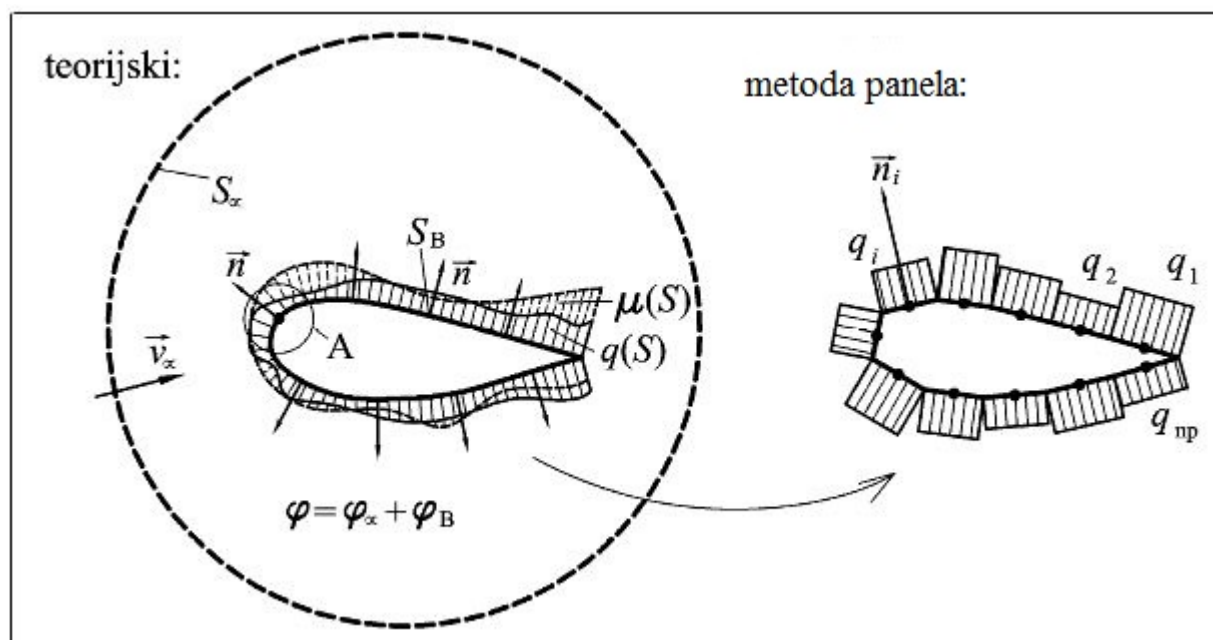
Brzina vjetra korištena u simulacijama je V_{vjetra} od 10 m/s, a kutna brzina rotora ω je maksimalna i ujedno optimalna vrijednost od 1,6755 1/s. Vrijednost dinamičke viskoznosti μ je $1,7885 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$, a gustoće fluida je $1,225 \text{ kg} / \text{m}^3$. Reynoldsov broj se mijenja u ovisnosti o aeroprofilu tj. parcijalnom stroju, iz razloga što se za svaki aeroprofil mijenja brzina nastrujavanja fluida i duljina tetive tj. chorda, a izračunava se kao:

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{rel}} \cdot c \cdot \rho}{\mu}, \quad (5.1)$$

gdje je c duljina tetive tj. chorda.

5.2. Diskretizacija modela

Za određivanje polja potencijalnog strujanja fluida oko parcijalnog stroja koristit će se metoda panela. Metoda panela je numerička metoda rješavanja potencijalnog strujanja u kojoj se površina tijela S_B modelira konačnim brojem segmenata. U ravninskom strujanju to mogu biti ravni segmenti, dijelovi parabole ili dijelovi krivulja višeg reda. Kontinuirana raspodjela elementarnih rješenja po površini također se zamjenjuje po segmentima konstantnom raspodjelom, linearnom raspodjelom ili nekom raspodjelom višeg reda. Segment površine s raspodjelom elementarnih rješenja naziva se panel. Na slici 5.1. prikazan je primjer diskretizacije jednog aeroprofila panelima.



Slika 5.1. Diskretizacija panelima

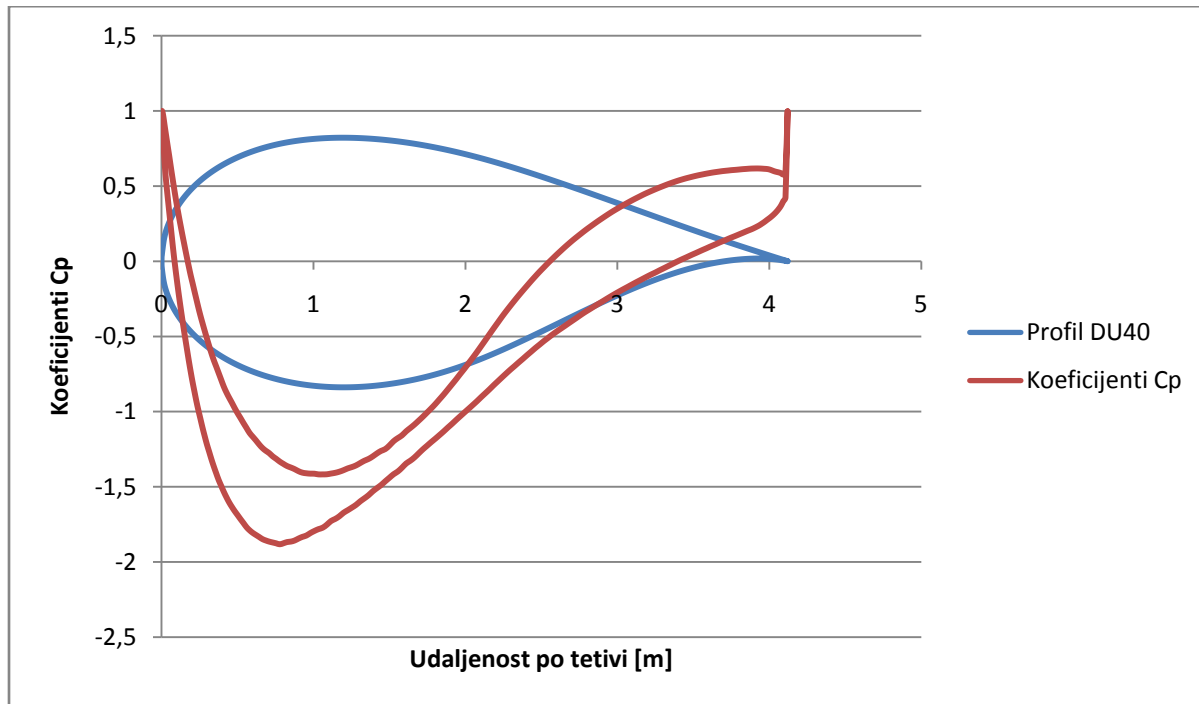
Analiza graničnog sloja sadrži integralne metode rješavanja problema prema prof. Richardu Eppleru. Te integralne metode su bazirane na diferencijalnim jednažbama koje opisuju porast parametara graničnog sloja u ovisnosti o vanjskim lokalnim brzinama strujanja fluida. Jednažbe su zatim integrirane počevši od točke zastoja. U programskom paketu JavaFoil nema interakcije između graničnog sloja i vanjskog strujanja fluida, pa se zbog toga velika odvajanja struja ne mogu analizirati. Kratka odvajanja struja na krajevima profila ne utječu puno na krajnji rezultat.

Kao i kod svake numeričke metode, pa tako i u metodi panela i integralnoj metodi proračuna graničnog sloja, dolazi do određenih grešaka u dobivenim rezultatima, ali očekujemo da će one u konkretnom slučaju proračuna ovog modela biti zanemarive.

6. Izračun rasporeda tlaka

Proračun rasporeda tlaka po parcijalnim strojevima dobivamo u programskom paketu JavaFoil. Tlakove koje dobivamo iz računalnih simulacija su statički tlakovi po obodu profila.

Na slici 6.1. prikazani su koeficijenti tlaka po obodu profila DU40 za napadni kut vjetra 0° .



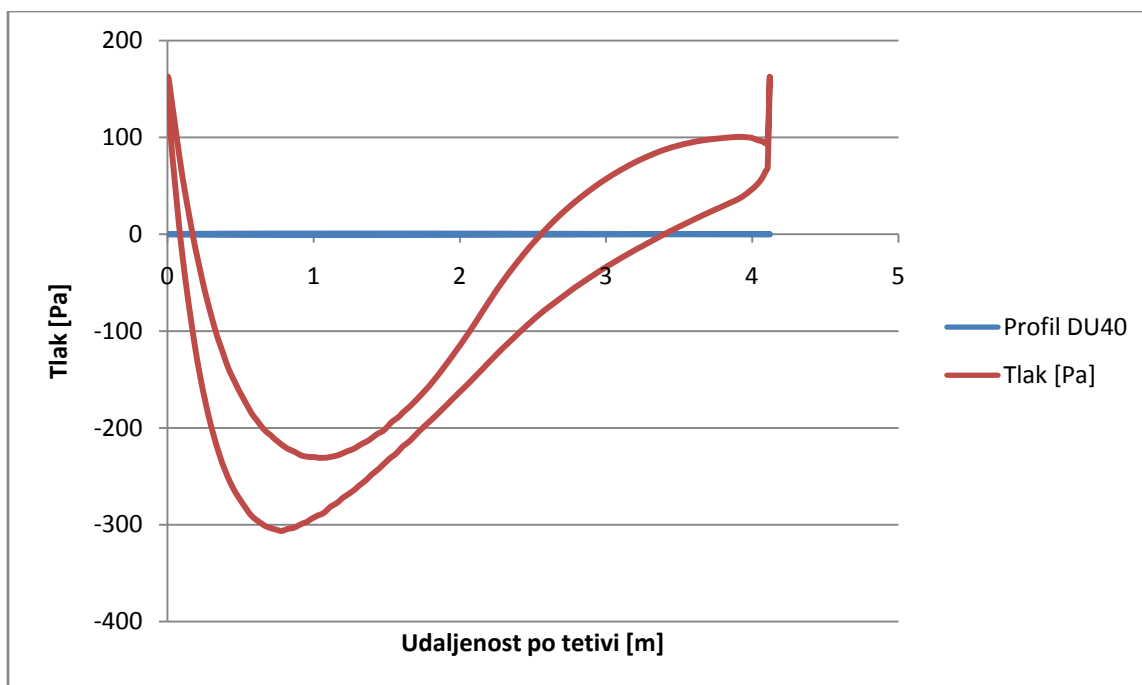
Slika 6.1. Raspodjela koeficijenta tlaka po obodu profila DU40

Tlak p po obodu profila dobivamo:

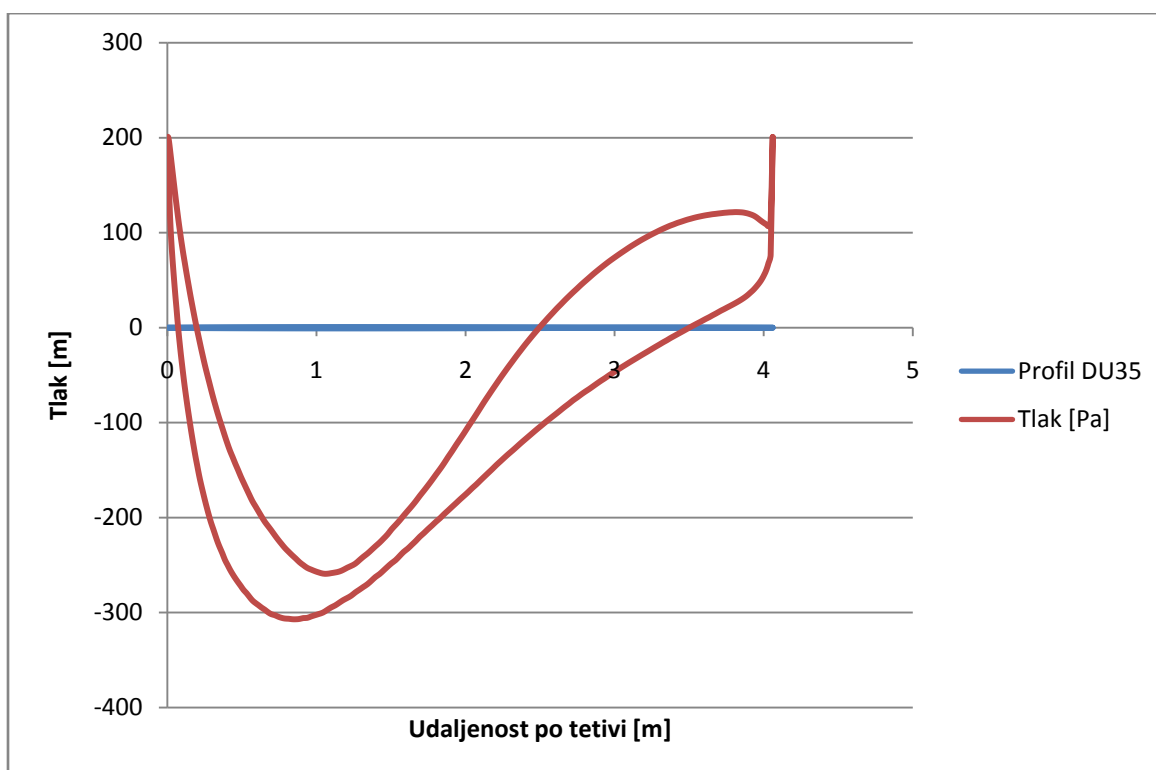
$$C_p = \frac{p - p_0}{0,5 \cdot \rho \cdot V_{\text{rel}}^2}, \quad (6.1)$$

te sređivanjem izraza uz $p_0 = 0$, dobivamo tlak p :

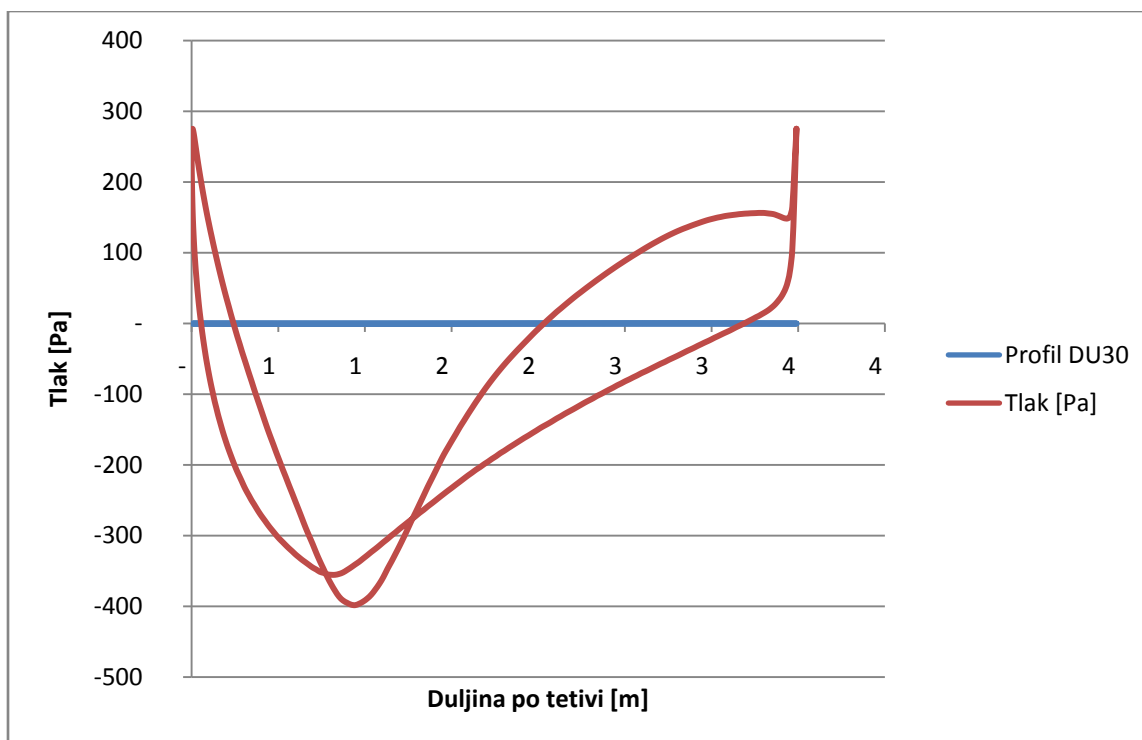
$$p = 0,5 \cdot \rho \cdot V_{\text{rel}}^2. \quad (6.2)$$



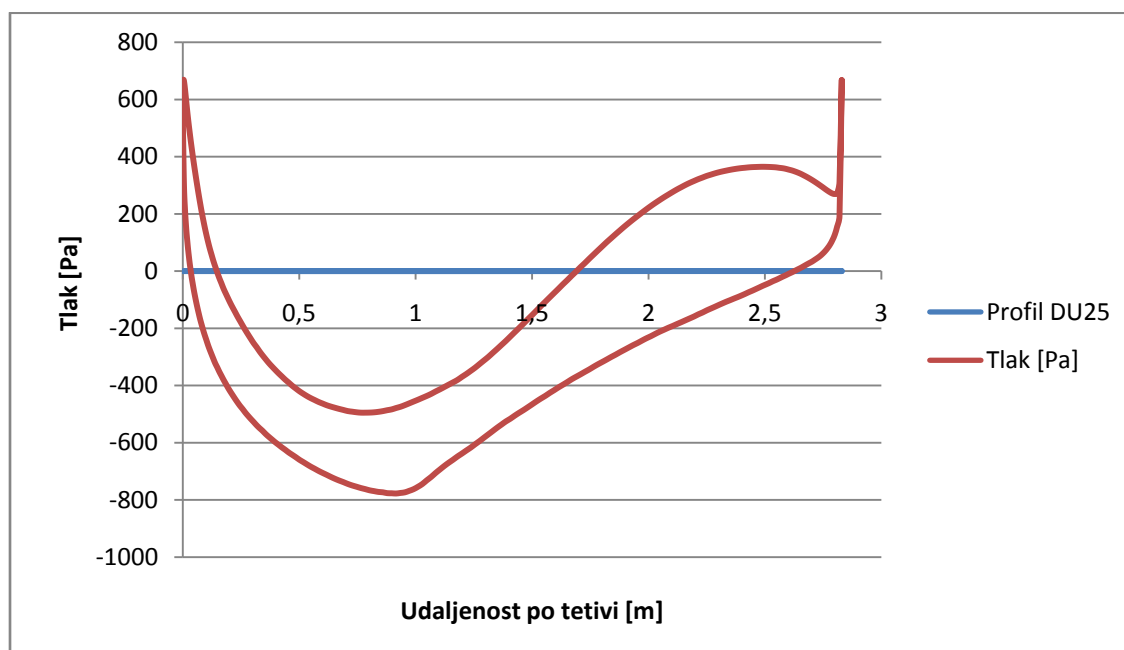
Slika 6.2. Raspodjela tlaka po obodu profila DU40



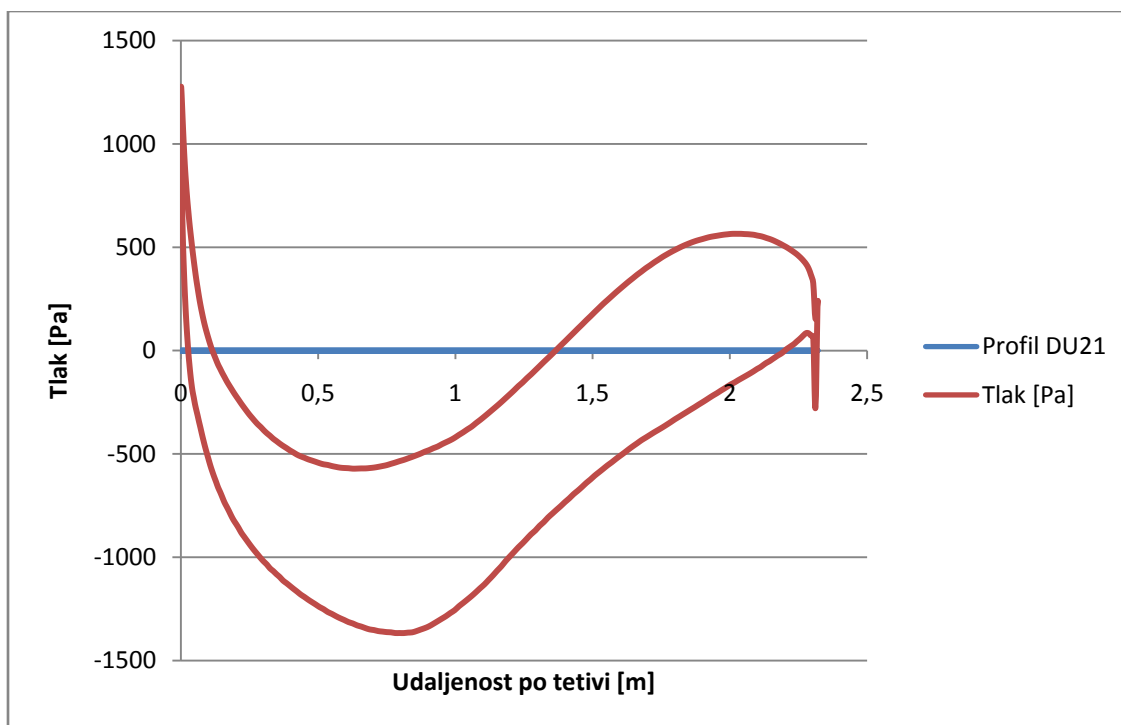
Slika 6.3. Raspodjela tlaka po obodu profila DU35



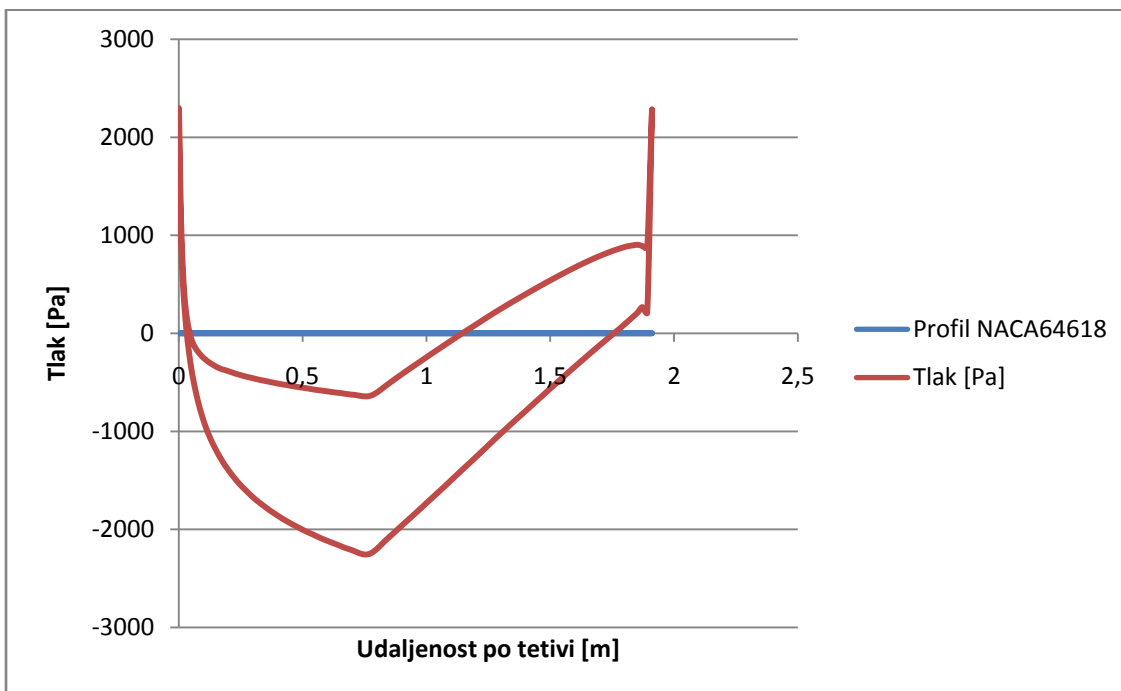
Slika 6.4. Raspodjela tlaka po obodu profila DU30



Slika 6.5. Raspodjela tlaka po obodu profila DU25



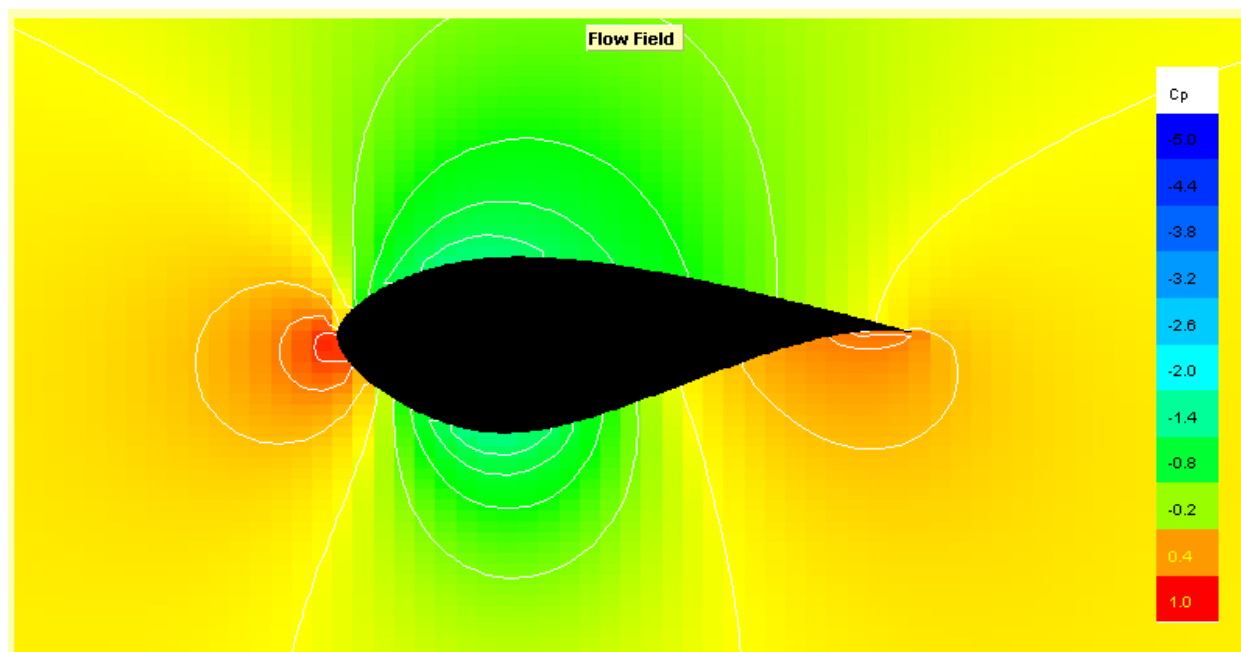
Slika 6.6. Raspodjela tlaka po obodu profila DU21



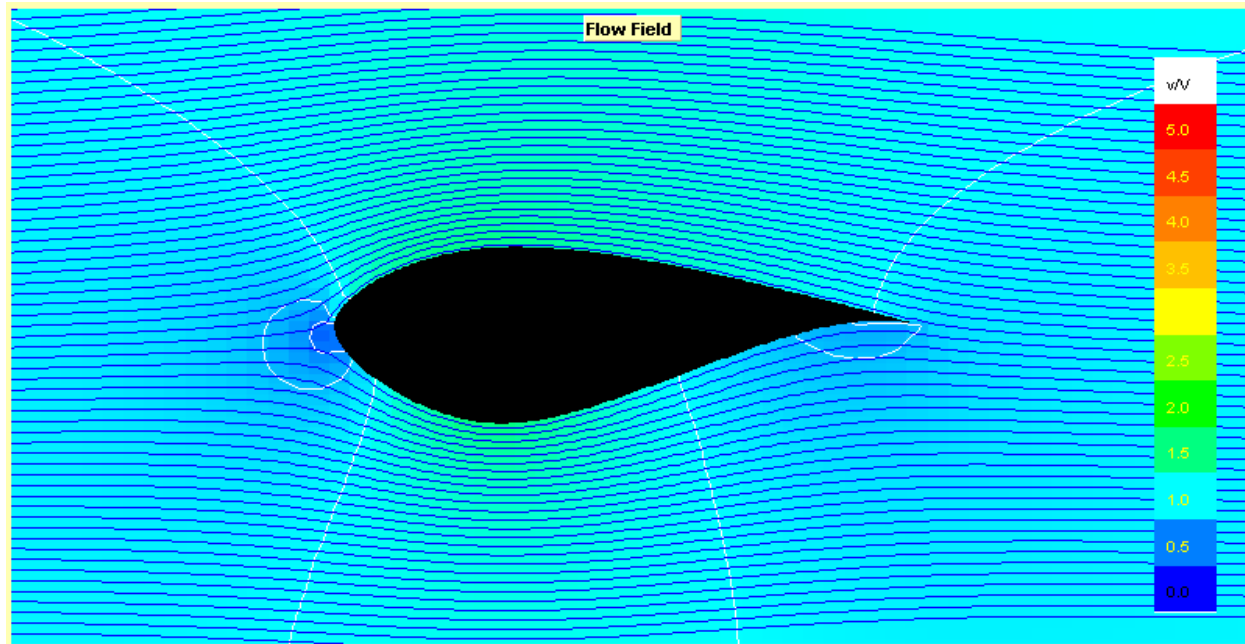
Slika 6.7. Raspodjela tlaka po obodu profila NACA64618

Kao što se vidi na dijagramima tlaka aeroprofila tlakovi su najveći na točkama zastoja. Također vidi se da tlakovi, po apsolutnim vrijednostima, rastu kako se bližimo kraju lopatice, a razlog tome su sve veće relativne brzine vjetra i sve veći kutevi napada vjetra.

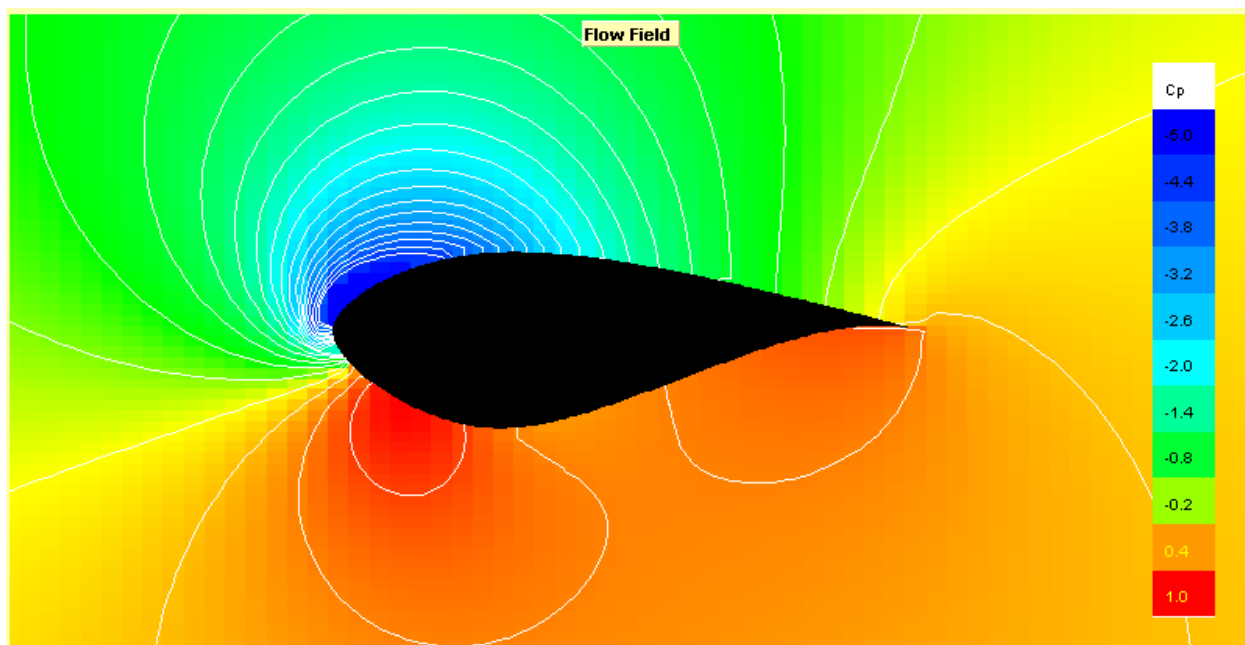
Na sljedećim slikama biti će grafički pokazane raspodjele brzina strujanja i raspodjele koeficijenata tlakova za različite kuteve napada vjetra na aeroprofilu DU30, dobivene računalnom simulacijom u programskom paketu JavaFoil.



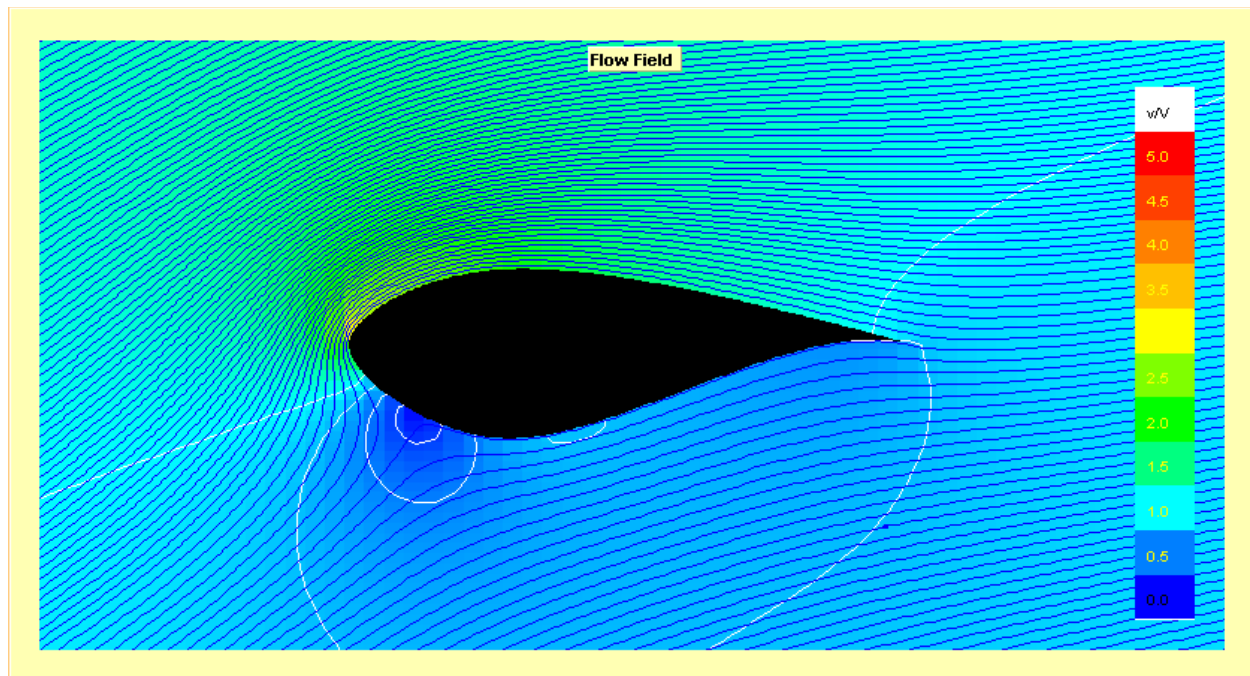
Slika 6.8. Raspodjela koeficijenta tlaka po obodu profila DU30 pri napadnom kutu 0°



Slika 6.9. Raspodjela brzina u okolini profila DU30 pri napadnom kutu 0°



Slika 6.10. Raspodjela koeficijenta tlaka po obodu profila DU30 pri napadnom kutu 20°



Slika 6.11. Raspodjela brzina u okolini profila DU30 pri napadnom kutu 20°

7. Proračun snage

Proračun snage vjetroatagregata radi se na način da se u programskom paketu JavaFoil, računalnom simulacijom, dobiju koeficijenti uzgona i otpora tj. C_L i C_D , te se onda u Excelu odrede ukupne sile i momenti potrebni za izračun snage. Kao referentni aeroprofil koristi se DU30, koji se nalazi na oko 30% ukupne duljine lopatice, te se za njega računalnom simulacijom odrede kutevi napada vjetra pri kojima se ostvaruju minimalni i maksimalni koeficijenti uzgona. Nakon što se odrede kutevi ide se u daljnji proračun za sve ostale profile koje zakrećemo za pitch kuteve.

7.1. Proračun sila i koeficijenata

Nastrujavanjem fluida na aeroprofil, zbog viskoznosti i otpora oblika, fluid na profil prenosi određene sile. Sile koje se javljaju na aeroprofilu, u njihovim smjerovima vektora, prikazane su na slici 4.9.. Proračun koeficijenata uzgona i otpora te sila koje djeluju na aeroprofil je proveden na šest parcijalnih strojeva pri osam napadnih kuteva vjetra. Kako programski paket JavaFoil nema implementirane metode za rješavanje nestacionarnih, turbulentnih strujanja oko aeroprofila, možemo očekivati veće greške pri većim napadnim kutevima vjetra kod kojih dolazi do odvajanja struja vjetra od profila, tj. strujanje prestaje biti laminarno.

Kako nam JavaFoil daje samo rezultate koeficijenata uzgona i otpora, a ne i sile, trebat ćemo koristiti sljedeće relacije koje ćemo proračunavati u Excelu:

$$C_L = \frac{F_L}{0,5 \cdot \rho \cdot V_{rel}^2 \cdot A} , \quad (7.1)$$

$$F_L = 0,5 \cdot C_L \cdot \rho \cdot V_{rel}^2 \cdot A , \quad (7.2)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0,5 \cdot \rho \cdot V_{rel}^2 \cdot A} , \quad (7.3)$$

$$F_D = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot V_{rel}^2 \cdot A , \quad (7.4)$$

gdje je A jedinična površina duljine tetive c .

Izračun ukupnih sila proračunava se prema jednadžbama (4.7) i (4.8).

7.1.1. Rezultati proračuna za profil DU40

U tablici 7.1. mogu se vidjeti vrijednosti s kojima se ulazi u računalnu simulaciju i proračun.

u [m/s]	12,8784
V_{rel} [m/s]	16,305
r [m]	7,6863
c [m]	4,12
Re	3758947

Tablica 7.1. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU40

U tablici 7.1. r označava radijus na kojemu se nalazi aeroprofil i izračunava se prema izrazu:

$$r = 1,578 + d , \quad (7.5)$$

gdje je d udaljenost aeroprofila po pitch osi od korijena lopatice i vadi se iz tablice 4.1., a 1,578 je udaljenost korijena lopatice od osi rotacije.

Tablica 7.2. prikazuje dobivene rezultate.

α [deg]	φ [deg]	CL	CD	FL [N]	FD [N]	F [N]	FU [N]
-44	82,84	-2,918	0,30414	-1957,6282	204,041476	1968,23294	-1039,46941
-34	72,84	-2,878	0,17329	-1930,793	116,256814	1934,28981	-1092,34728
-26	64,84	-2,518	0,09973	-1689,2761	66,9068732	1690,60058	-983,201643
-18	56,84	-1,824	0,05472	-1223,6853	36,7105595	1224,23585	-721,501155
-12	50,84	-1,152	0,03364	-772,85389	22,5684069	773,183329	-456,172439
-6	44,84	-0,398	0,02256	-267,01028	15,1350552	267,438893	-151,805384
-2	40,84	0,13	0,01978	87,2144141	13,2700085	88,2181793	63,9705797
2	36,84	0,695	0,0188	466,261675	12,612546	466,432231	295,924238

Tablica 7.2. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU40

7.1.2. Rezultati proračuna za profil DU35

Ulazne vrijednosti potrebne za proračun su u tablici 7.3., a rezultati su prikazani u tablici 7.4..

u [m/s]	15,1051
V_{rel} [m/s]	18,1153
r [m]	9,015
c [m]	4,06
Re	4130923

Tablica 7.3. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU35

α [deg]	φ [deg]	CL	CD	FL [N]	FD [N]	F [N]	FU [N]
-37	82,84	-1,625	0,25407	-1326,1008	207,336888	1342,21163	-559,149714
-27	72,84	-1,989	0,1389	-1623,1474	113,35102	1627,10051	-801,493597
-19	64,84	-1,73	0,07522	-1411,7874	61,3841882	1413,12122	-728,150255
-11	56,84	-0,961	0,0242	-784,23564	19,7487019	784,484258	-416,446365
-5	50,84	-0,255	0,01646	-208,09583	13,4323815	208,528898	-103,672637
1	44,84	0,518	0,01251	422,720148	10,2089364	422,843405	241,862337
5	40,84	1,04	0,01316	848,704543	10,7393767	848,772488	477,456373
9	36,84	1,532	0,01642	1250,20708	13,399739	1250,27888	701,311935

Tablica 7.4. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU35

7.1.3. Rezultati proračuna za profil DU30

Prifil DU30 je ujedno i referentni profil pomoću kojega su određeni pitch kutevi za proračun ostalih profila. Pitch kutevi su određeni na temelju dobivenih rezultata za minimalni i maksimalni koeficijent uzgona na profilu DU30.

Ulazne vrijednosti potrebne za proračun su u tablici 7.5., a rezultati su prikazani u tablici 7.6..

u [m/s]	21,2343
V_{rel} [m/s]	23,4711
r [m]	12,67
c [m]	3,49
Re	4580843

Tablica 7.5. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU30

α [deg]	φ [deg]	CL	CD	FL [N]	FD [N]	F [N]	FU [N]
-26	82,84	-1,964	0,12346	-2312,8097	145,3867	2317,37476	-853,852518
-16	72,84	-1,488	0,032	-1752,2713	37,683253	1752,67641	-712,471516
-8	64,84	-0,6	0,01492	-706,56099	17,5698167	706,779411	-285,138284
0	56,84	0,372	0,01008	438,067816	11,8702247	438,228609	197,379825
6	50,84	1,166	0,00864	1373,08353	10,1744783	1373,12123	594,213554
12	44,84	1,779	0,02031	2094,95335	23,9170896	2095,08987	914,202506
16	40,84	1,985	0,04127	2337,53929	48,5996203	2338,04445	1039,88761
20	36,84	2,04	0,06764	2402,30738	79,652976	2403,62754	1095,57626

Tablica 7.6. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU30

7.1.4. Rezultati proračuna za profil DU25

Ulazne vrijednosti potrebne za proračun su u tablici 7.7., a rezultati su prikazani u tablici 7.8..

u [m/s]	31,514
V_{rel} [m/s]	33,0625
r [m]	18,8087
c [m]	2,83
Re	5230479

Tablica 7.7. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU25

α [deg]	φ [deg]	CL	CD	FL [N]	FD [N]	F [N]	FU [N]
-15	82,84	-1,248	0,03639	-2364,7133	68,9518563	2365,71835	-649,501756
-5	72,84	-0,144	0,01394	-272,85153	26,4135443	274,127041	-57,3494457
3	64,84	0,875	0,01153	1657,95203	21,8470707	1658,09596	522,283036
11	56,84	1,709	0,02487	3238,21716	47,1237336	3238,56002	1024,33809
17	50,84	1,891	0,04593	3583,07118	87,0282705	3584,12793	1166,67713
23	44,84	1,678	0,08664	3179,47829	164,165673	3183,71364	1118,13215
27	40,84	1,436	0,12976	2720,93613	245,869549	2732,02219	1057,31997
31	36,84	1,195	0,18915	2264,28877	358,401858	2292,47803	1026,46542

Tablica 7.8. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU25

7.1.5. Rezultati proračuna za profil DU21

Ulazne vrijednosti potrebne za proračun su u tablici 7.9., a rezultati su prikazani u tablici 7.10..

u [m/s]	44,5959
V_{rel} [m/s]	45,7034
r [m]	26,617
c [m]	2,32
Re	5925978

Tablica 7.9. Ulazne vrijednosti za aeroprofil DU21

α [deg]	φ [deg]	CL	CD	FL [N]	FD [N]	F [N]	FU [N]
-8	82,84	-0,415	0,01604	-1231,7971	47,6097018	1232,71688	-223,064143
2	72,84	0,815	0,00936	2419,07151	27,78222	2419,23104	556,407785
10	64,84	1,679	0,02115	4983,58412	62,7771317	4983,9795	1151,67636
18	56,84	1,849	0,04753	5488,17572	141,077876	5489,98868	1338,48569
24	50,84	1,521	0,09429	4514,61075	279,870248	4523,2773	1260,89662
30	44,84	1,113	0,19614	3303,5909	582,179982	3354,49644	1290,90704
34	40,84	0,863	0,33023	2561,54443	980,184029	2742,67581	1516,90554
38	36,84	0,675	0,44717	2003,52548	1327,28369	2403,28865	1733,49878

Tablica 7.10. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil DU21

7.1.6. Rezultati proračuna za profil NACA64618

Ulazne vrijednosti potrebne za proračun su u tablici 7.11., a rezultati su prikazani u tablici 7.12..

u [m/s]	60,4487
V_{rel} [m/s]	61,2703
r [m]	36,078
c [m]	1,93
Re	6622052

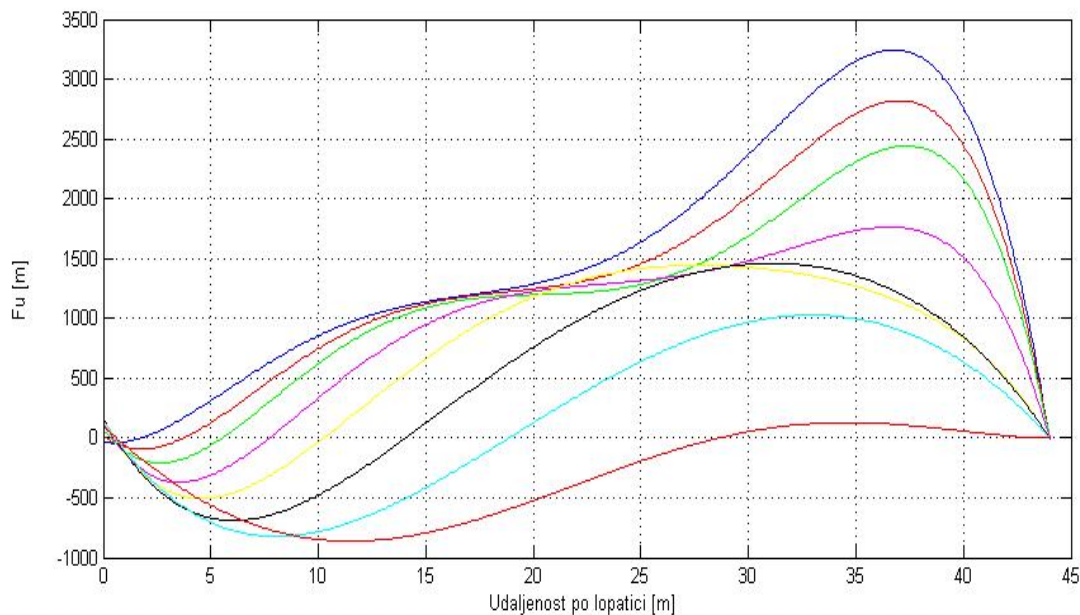
Tablica 7.11. Ulazne vrijednosti za aeroprofil NACA64618

α [deg]	φ [deg]	CL	CD	FL [N]	FD [N]	F [N]	FU [N]
-3	82,84	0,15	0,00737	665,663394	32,7062614	666,466393	140,9115
7	72,84	1,35	0,01376	5990,97054	61,063522	5991,28173	1038,03886
15	64,84	1,772	0,02853	7863,70356	126,609177	7864,72272	1408,35683
23	56,84	1,321	0,08243	5862,27562	365,804224	5873,67757	1317,68887
29	50,84	0,851	0,25506	3776,53032	1131,89403	3942,5075	1733,08907
35	44,84	0,577	0,41999	2560,58519	1863,81312	3167,08002	2256,73796
39	40,84	0,456	0,52831	2023,61672	2344,51085	3097,05598	2643,35075
43	36,84	0,368	0,64064	1633,09419	2843,00398	3278,66867	3071,42196

Tablica 7.12. Vrijednosti koeficijenata i sila za aeroprofil NACA64618

7.2. Proračun momenta i snage

Proračun momenta dobiven je tako da je kroz vrijednosti sila od svakog parcijalnog stroja provučen polinom petog reda koji prikazuje raspodjelu opterećenja po duljini lopatice. Polinomi su povučeni za svaki od osam izračunatih pitch kuteva.



Slika 7.1. Raspodjela resultantne sile po duljini lopatice

Sa slike 7.1. vidi se da će se za različite pitch kuteve zakreta lopatice dobiti različiti iznosi snage. Svi rezultati dobiveni su za vjetar brzine 10 m/s i optimalnu kutnu brzinu rotora koja iznosi $1,6755 \text{ s}^{-1}$. Lopatica je od samog rotora vjetroturbine udaljena 1,578 m, a prvi dio lopatice je kružnica kojoj je koeficijent uzgona jednak nuli. Na mjestu lopatice gdje se nalazi kružnica, a to je od korjena lopatice pa do 2,39 m udaljenosti od korijena, pretpostavljena je resultantna sila iznosa nula, jer iako kružnica ima koeficijent otpora 0,5, pri većim kutevima kada su sile na ostalim profilima velike ona je na tom mjestu zanemarivog iznosa. Na kraju lopatice, za vrijednost resultantne sile također je uzeta vrijednost nula, zato što krajnji aeroprofil dimenzijama teži u nulu.

Jednadžba prema kojoj se računa snaga glasi:

$$P = 3 \int_{2,39}^{44} F_u(x) \cdot u(x) dx , \quad (7.6)$$

gdje je 3 zbog tri lopatice na vjetroagregatu, sila $F_u = F_u(x)$ je funkcija od udaljenosti po lopatici, funkcija $u(x)$ opisuje raspodjelu ododne brzine po udaljenosti lopatice i glasi:

$$u(x) = \omega \cdot x . \quad (7.7)$$

Ukupnu silu koja djeluje na lopaticu i koja se kasnije koristi u jednadžbi za izračun momenta dobivamo sljedećim izrazom:

$$A = \int_{2,39}^{44} F_u(x) dx . \quad (7.8)$$

Točku u kojoj djeluje sila A je težište površine ispod krivulje $F_u(x)$, a dobivamo ju sljedećom integracijom:

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \cdot \int_{2,39}^{44} x \cdot F_u(x) dx . \quad (7.9)$$

Ukupni moment na sve tri lopatice je umnožak sile A i duljine od rotora do težišta:

$$M = 3 \cdot (1,57 + 2,39 + \bar{x}) \cdot A , \quad (7.10)$$

gdje je 1,57 m udaljenost korjena lopatice od središta rotacije, a 2,39 m udaljenost od korjena lopatice do mjesta gdje profil lopatice prestaje biti kružnica.

Snaga se još može računati i prema izrazu:

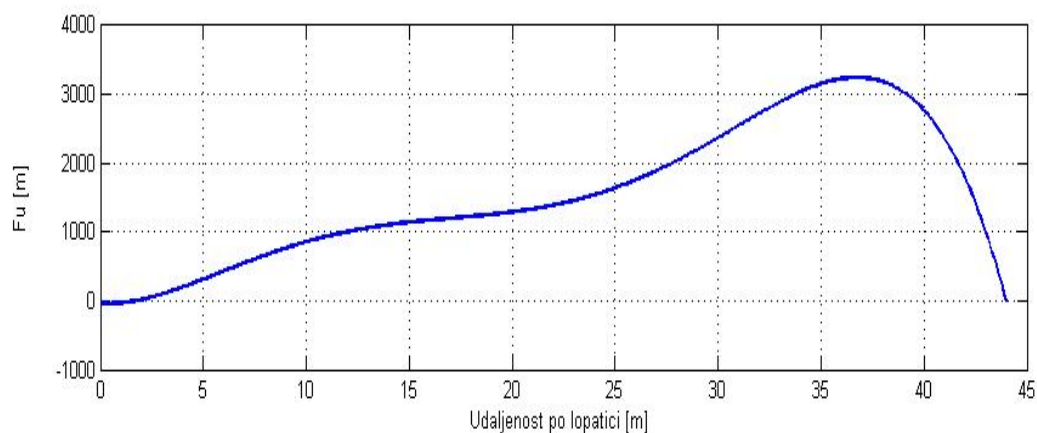
$$P = M \cdot \omega \quad (7.11)$$

U ovom radu koristila se jednadžba (7.6) za proračun snage vjetroagregata.

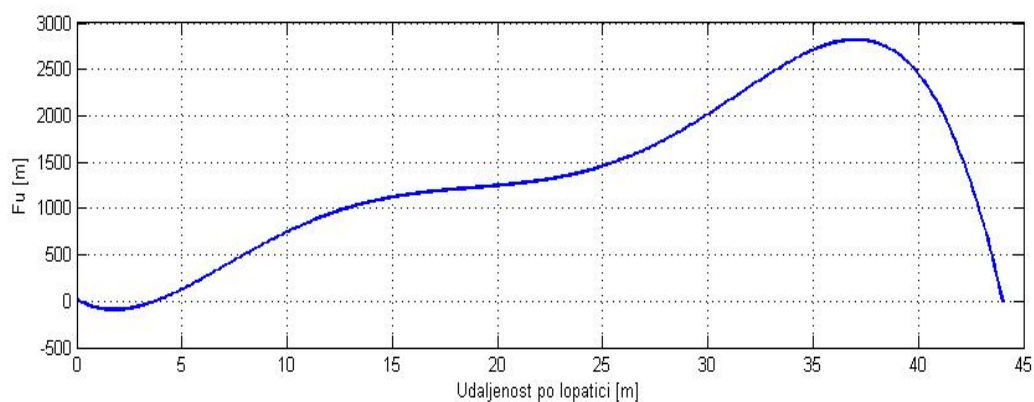
U sljedećoj tablici nalaze se dobiveni rezultati nakog integracije izraza sa snagu i moment.

Pitch kut [deg]	A [N]	x [m]	M [Nm]	P [MW]
82,84	-13312	60,84	-2588048,486	9,773
72,84	7455	35,53	883318,1892	8,6117
64,84	23234	29,86	2357091,623	7,5237
56,84	31368	29,11	3111774,61	6,0534
50,84	41374	28,94	4083452,441	4,7075
44,84	51723	28,74	5074445,256	4,1499
40,84	59607	28,69	5838273,183	2,2801
36,84	67772	-34,08	-6122922,335	-0,75551

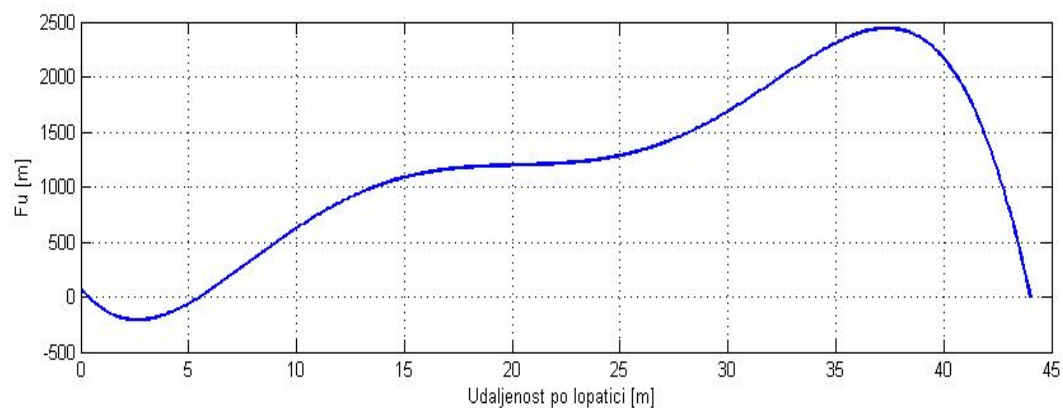
Tablica 7.13. Vrijednosti snaga i momenata za proračunate pitch kuteve



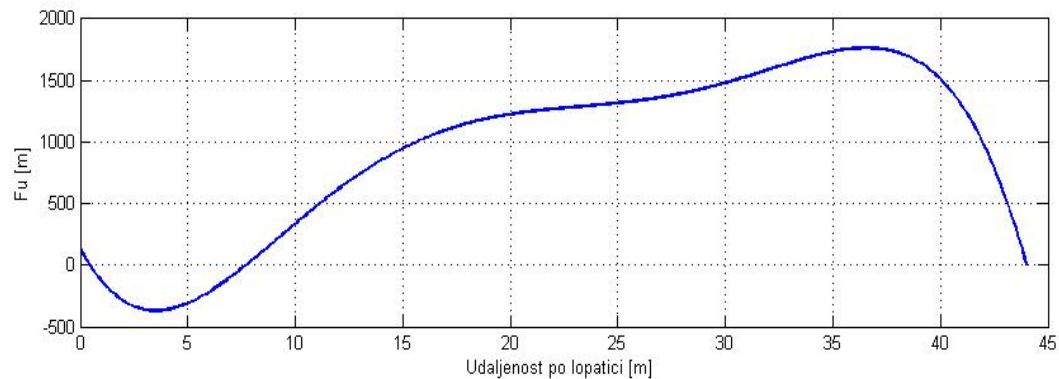
Slika 7.2. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut 36,84°



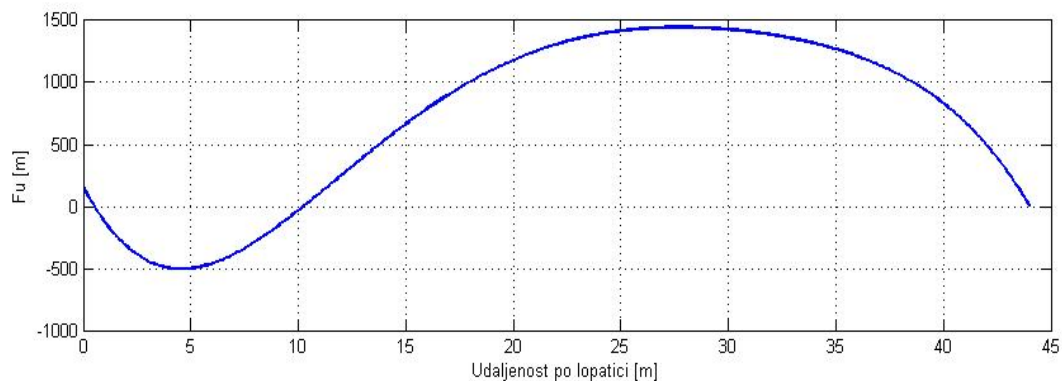
Slika 7.3. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut 40,84°



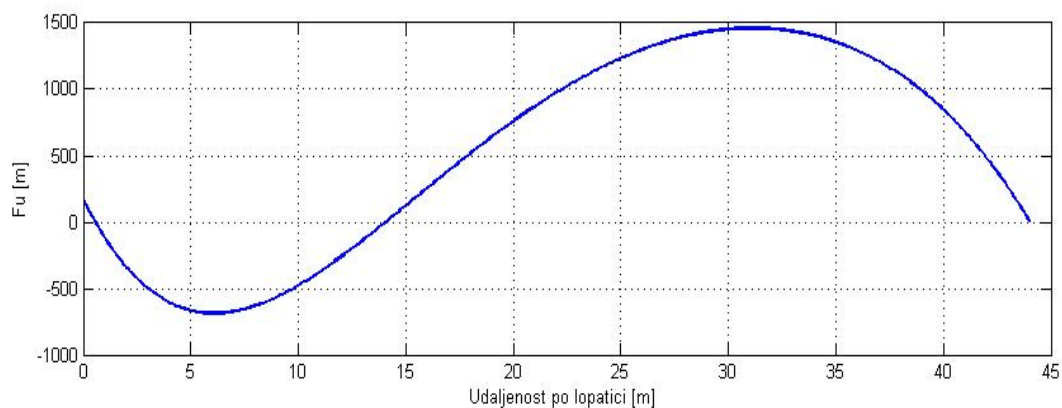
Slika 7.4. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $44,84^\circ$



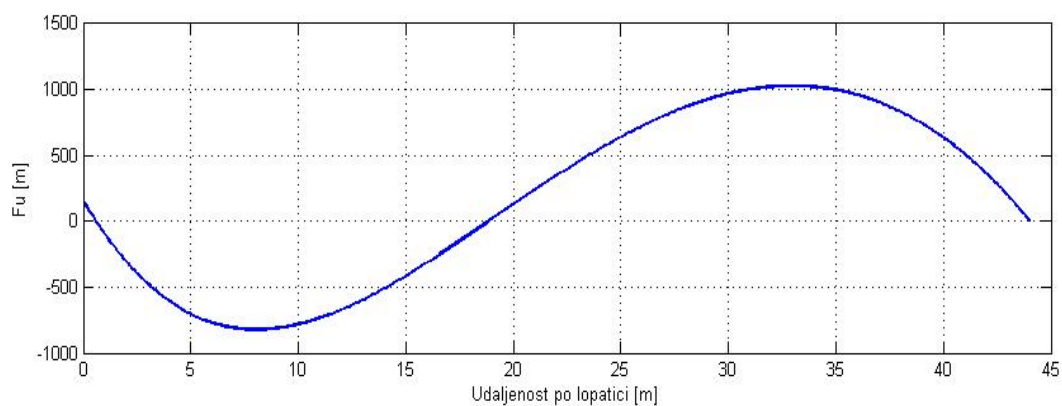
Slika 7.4. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $50,84^\circ$



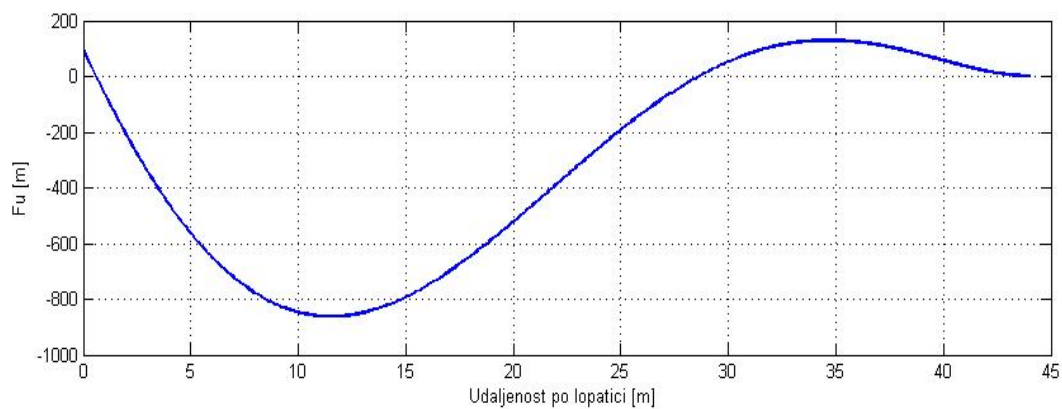
Slika 7.4. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $56,84^\circ$



Slika 7.4. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $64,84^\circ$



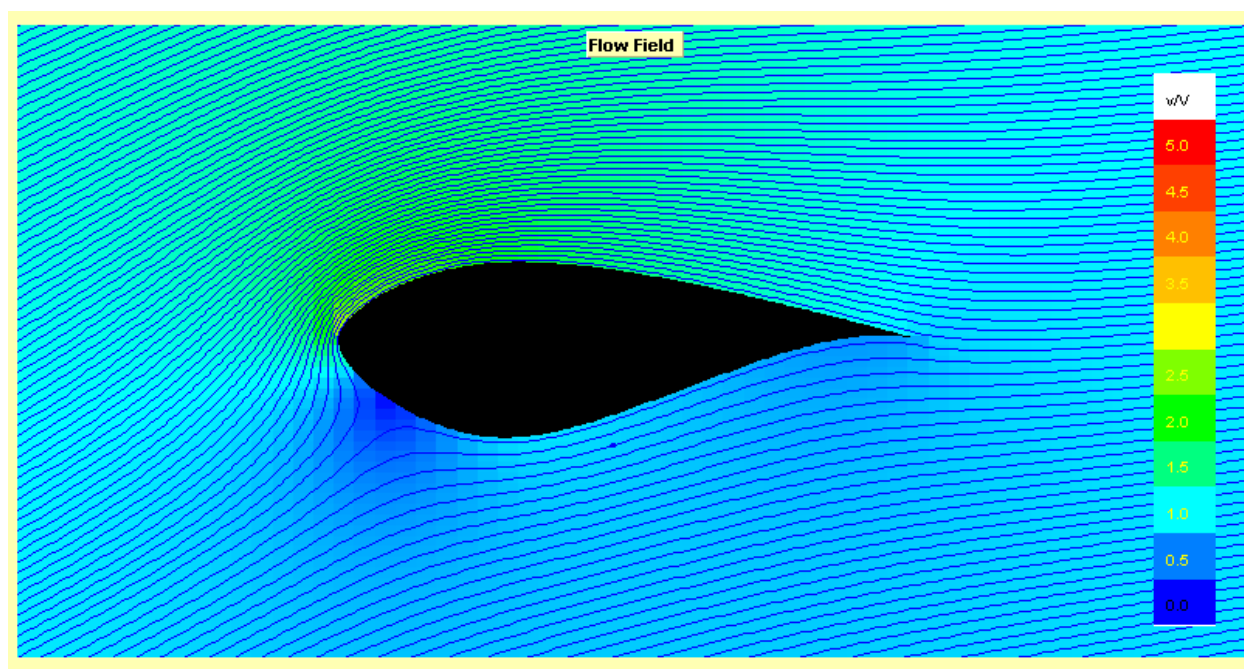
Slika 7.4. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $72,84^\circ$



Slika 7.4. Raspodjela rezultantne sile po duljini lopatice za pitch kut $82,84^\circ$

8. Diskusija rezultata i zaključak

Iz tablice 7.13. vidljivo je da za veće kuteve zakreta lopatice tj. veće kuteve napada vjetra dobivamo veće snage vjetroatregata. Za najveći kut zakreta lopatice od 82.84° dobivamo snagu u iznosu od 9,773 MW što je skoro četiri puta iznad maksimalne snage na kojoj konkretni vjetroatregat radi u praksi, a to je 2,5 MW. Za pitch kut od $40,84^\circ$, kada je na referentnom profilu kut napada vjetra 16° , snaga vjetroatregata u računalnoj simulaciji iznosi 2,28 MW što je dosta blizu realnoj vrijednosti od 2,5 MW.



Slika 8.1. Brzine strujanja oko profila DU30 pod kutem napada vjetra 16°

Greška proračuna snage za veće napadne kuteve leži u tome što model strujanja, koji je korišten u ovome radu, nije pogodan za opisivanje takvih režima strujanja oko profila jer dolazi do odvajanja struje od profila te nestaje granični sloj na određenim mjestima, a programski paket koji je korišten ne može opisivati takve pojave. Model strujanja je u ovom radu dvodimenzijski tj. proračun je rađen za parcijalne strojeve koji su presjeci na određenim mjestima lopatice te se može zaključiti da je dodatna pogreška proračuna i u zanemarivanju trodimenzijskog režima strujanja što je u realnosti slučaj, tj. okretanjem lopatica oko rotora dolazi do strujanja duž osi

lopatica koje ruši vrijednosti koeficijenata uzgona i smanjuje iznos snage. Kako su na vjetroagregatu po tri lopatice one utječu jedna na drugu radeći poremećaj u struji vjetra pa se i tu ruše vrijednosti koeficijenata uzgona koji nisu uzeti u obzir kod ovoga proračuna. Zanimariva greška je i interpoliranje rezultantne sile duž lopatice polinomom petog reda za koji smo mogli odrediti samo devet točaka gdje smo znali točne iznose sila proračunate na parcijalnim strojevima.

Prema rezultatima iz tablice 7.13. vidljivo je da snaga u velikoj mjeri ovisi o kutu zakreta lopatice, tzv. pitch kutu, jer on diktira iznose koeficijenata uzgona i otpora iz kojih se proračunava snaga. Također, veliki utjecaj na iznos snage ima i kutna brzina rotora vjetroagregata koja mijenja iznose relativnih brzina vjetra. Kod iznosa snage dobivenog računalnom simulacijom, koji je ispao najbliže realnom iznosu od 2,5 MW, napadni kut vjetra na referentnom profilu DU30 iznosi 16° što je oko vrijednosti kuteva kod kojih je strujanje još uvijek laminarno. Za kuteve veće od 16° strujanje postaje turbulentno i nestabilno pa se u praksi lopatice niti ne zakreću za veće kuteve.

Rezultati dobiveni ovim proračunom i računalnom simulacijom za manje kuteve su jako blizu eksperimentalnih rezultata te je model kojim je strujanje opisano podogan. Za velike kuteve napada vjetra proračuni i simulacije daju puno veće rezultate od realnih pa se i model strujanja koji je korišten ne može koristiti kao povjerljiv.

9. Literatura

- [1.] Mehanika fluida II - što valja zapamtiti, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [2.] Džijan, I.: Računalna dinamika fluida, podloge za predavanja, Zagreb, 2010.
- [3.] Martin Hepperle - JavaFoil User's Guide, 2014.